

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ASPECTOS GENERALES

En los últimos años, el sector de la construcción ha alcanzado unos índices de actividad muy elevados configurándose como una de las claves del crecimiento de la economía española. Esta situación ha provocado, sin embargo, un auge extraordinario de la generación de residuos procedentes tanto de la construcción de infraestructuras y edificaciones de nueva planta como de la demolición de inmuebles antiguos, sin olvidar los derivados de pequeñas obras de reforma de viviendas y locales. Dichos residuos forman la categoría denominada residuos de construcción y demolición.

El problema ambiental que plantean estos residuos se deriva no sólo del creciente volumen de su generación, sino de su tratamiento, que todavía hoy es insatisfactorio en la mayor parte de los casos. En efecto, a la insuficiente prevención de la producción de residuos en origen se une el escaso reciclado de los que se generan.

Entre los impactos ambientales que ello provoca, cabe destacar el deterioro paisajístico y la eliminación de estos residuos sin aprovechamiento de sus recursos valorizables. Esta grave situación debe corregirse, con el fin de conseguir un desarrollo más sostenible de la actividad constructiva.

Aunque no hay datos fiables de la producción de residuos de construcción y demolición en España, según el GERD (Gremio de Entidades del Reciclaje de Derribos) se podría estimar esta producción en el año 2007 en unos 50 millones de toneladas. Estos residuos están formados principalmente por materiales cerámicos y hormigón, aunque en menor proporción también están presentes otros materiales como piedra, áridos, madera, metales o plásticos. Aproximadamente un 20% del total corresponde a escombros de hormigón (Fuente EDA, European Demolition Association).

Ya el Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (PNRCD) 2001-2006, aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, proponía, entre las medidas instrumentales para el logro de sus objetivos, la elaboración de una normativa específica para este flujo de residuos, basada en los principios de jerarquía de gestión y de responsabilidad del productor. Recientemente ha salido a la luz el *REAL DECRETO 105/2008*, de 1 de febrero de 2008, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

Una de las dificultades por las que en la actualidad no se alcanzan unos niveles satisfactorios de reciclado de residuos de construcción y demolición es el hecho de que en su mayoría se depositan en vertedero a coste muy bajo, sin tratamiento previo y, a menudo, sin cumplir con los requisitos establecidos en la normativa sobre vertederos.

El artículo 1 del Real Decreto de 2008, citando textualmente, “tiene por objeto establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, con el fin de fomentar, por este orden, su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, asegurando que los destinados a operaciones de eliminación reciban un tratamiento adecuado, y contribuir a un desarrollo sostenible de la actividad de construcción”.

Se entiende por hormigón reciclado el hormigón fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido reciclado y árido natural. Los principales aspectos que influyen en la calidad del hormigón fabricado con árido reciclado son los siguientes:

- Cuanto mayor es el contenido de árido reciclado utilizado, menor es la calidad del hormigón reciclado en relación a un hormigón convencional.
- El tamaño máximo del árido influye en la calidad del hormigón, ya que las fracciones más finas son las que presentan peores propiedades.
- La calidad del hormigón de origen del que proceden los áridos reciclados influye en la calidad del hormigón reciclado, aunque lo hace en mayor medida cuando el hormigón reciclado es de elevada resistencia.
- La calidad del árido reciclado (que está muy relacionada con su contenido de mortero adherido) y el contenido de impurezas influye también en la calidad del hormigón reciclado.
- También influye la categoría resistente del hormigón reciclado, obteniéndose los mayores descensos en los hormigones con mayor nivel de resistencia.

La causa principal por la que no se usa suficientemente el montante de árido reciclado, son las propiedades ligeramente menos eficaces que presenta frente al árido natural, lo que conlleva unas menores prestaciones del hormigón fabricado con dichos áridos, y todavía no está normalizada su utilización. Una de las propiedades que resulta más afectada es la absorción, más alta en

áridos reciclados, y este estudio pretende trabajar ésta propiedad específica de los áridos y el hormigón reciclado para obtener unas propiedades satisfactorias que permitan el uso regular del árido reciclado en la construcción, contribuyendo así a un desarrollo sostenible del planeta.

La planta de reciclaje de Les Franqueses, gestionada por TecnoCatalana de Runes S.A. genera 75 Tn de árido reciclado por hora, lo que supone unas 200000 Tn al año de residuos. El almacén de central tiene una capacidad de 10000Tn, y es evidente que tal cantidad de residuos necesita una buena gestión para evitar problemas. Una buena solución para ello sería hallar una aplicación de los áridos, normalizar su utilización en obra para valorizar este volumen de residuos tan grande.

1.2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El presente estudio se basa en la realización y posterior estudio de cinco fases experimentales de hormigón fabricado con áridos reciclados. Los áridos reciclados de diferentes tipologías son materiales que ya se utilizan ampliamente en la construcción. Lo que diferencia las propiedades de los hormigones es, por un lado la dosificación con la que se mezclen sus componentes, el proceso de fabricación así como también las propiedades de cada uno de ellos.

Para poder realizar un estudio amplio sobre cómo afecta el árido reciclado y sus propiedades en el hormigón destinado a obra civil, se ha separado cada estudio en una fase experimental, las cuales se detallan a continuación. En las tres primeras fases se utilizan los mismos áridos reciclados, proporcionados por el Proyecto RECHNOR, proyecto de investigación financiado por el ministerio de medioambiente y en las dos últimas fases se utilizan áridos reciclados proporcionados por TecnoCatalana de Runes S.A.

FASE 1: Realización del Proyecto RECHNOR, que se basa en el estudio de una nueva metodología y dosificación en el tratamiento del árido reciclado. En esta fase los áridos utilizados se presaturan previamente a la fabricación del hormigón para evitar la absorción de H₂O específica en el hormigón. Se fabrican 2 tipos de hormigón, de relación a/c 0,65 y 0,5 respectivamente. Para cada uno de estos hormigones se fabrican 4 tipos de hormigón, con sustitución de árido reciclado respectivamente del 0%, 20%, 50% y 100%.

FASE 2: Modificación de la metodología de la fase 1, es decir, se fabrica hormigón de relación a/c efectiva 0,5, pero sin presaturar previamente los áridos. De esta forma se intentará demostrar la influencia de la metodología de trabajo en las propiedades finales del hormigón, sobretodo en la permeabilidad. Se fabrican 4 hormigones con sustitución de árido reciclado respectivamente del 0%, 20%, 50% y 100%.

FASE 3: Se fabrica el hormigón igual que en la fase 2 pero extrayendo totalmente el contenido bituminoso encontrado en el árido reciclado. Se fabrican 3 hormigones con sustitución de árido reciclado respectivamente del 20%, 50% y 100%.

FASE 4: Se cambia el árido reciclado utilizado hasta el momento por árido reciclado obtenido de la demolición directa de hormigón. La principal característica de estos áridos es la no-carbonatación de los mismos. Se fabrican 3 hormigones con sustitución de árido reciclado respectivamente del 20%, 50% y 100%, todos ellos con relación agua/cemento efectiva de 0,5.

FASE 5: Se procede a la carbonatación acelerada de los áridos mediante inyección de CO₂ en cámaras acondicionadas, para comparar entre las fases 4 y 5 los efectos de la carbonatación del árido reciclado en las propiedades finales del hormigón. Se fabrican 3 hormigones con sustitución de árido reciclado respectivamente del 20%, 50% y 100%, todos ellos con relación agua/cemento efectiva de 0,5.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es analizar la influencia que tienen tanto los áridos reciclados como el proceso de fabricación del hormigón reciclado, en las propiedades finales del hormigón endurecido, tanto a nivel de resistencias como de permeabilidad. Para ello trataremos de determinar cómo afecta la metodología de fabricación del hormigón en sus propiedades finales, y definir la mejor estrategia al respecto. Se determinarán las permeabilidades de todos los hormigones fabricados para poder definir el proceso más eficaz en esta propiedad del hormigón

El estudio de los áridos reciclados como componente para la fabricación de hormigón ha sido ampliamente probado y se han estudiado numerosas veces las propiedades que puede aportar a estos hormigones reciclados. Su uso no es ni mucho menos novedoso puesto que en algunos países de la unión europea, como por ejemplo Holanda, país pionero y más avanzado en la fabricación de hormigón reciclado ya se utilizan desde hace años para su uso en la construcción.

La importancia de nuestro estudio radica en el hecho que los áridos reciclados pueden ser diferentes en función de la planta de reciclaje y de los procesos de tratamiento de los mismos y por ello se deben estudiar sus propiedades físicas y actuar sobre los áridos para poder conseguir su máximo rendimiento y eficacia en la fabricación del hormigón.

El primer paso consistirá en la búsqueda de información de todos aquellos estudios relacionados con el tema y realizar el estado del arte. Para ello se utilizarán las bases de datos de revistas científicas relacionadas en este ámbito. Además también se buscarán todas las normas que se necesitarán más adelante para la realización de los ensayos.

Antes de la fabricación de hormigón el trabajo experimental se empezó con la caracterización física de todos los áridos a utilizar. Después se realizó la fabricación de los hormigones, en esta fase se analiza la temperatura del hormigón a la hora de fabricar así como la consistencia del hormigón fresco.

En estado endurecido se determinó las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, tracción indirecta y módulo de elasticidad) y la permeabilidad, succión y resistencia a altas temperaturas.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a los áridos reciclados.

Se conoce como árido reciclado (AR) todos aquellos residuos pétreos provenientes de la construcción y demolición de obra civil. El reciclaje de estos residuos de construcción y demolición se estudia desde los años 50, cuando a raíz de un considerable aumento de la cantidad de obras civiles debido a una obligada evolución de las infraestructuras, se hizo necesario encontrar una aplicabilidad a la creciente cantidad de residuos de la construcción.

Así pues, los residuos de hormigón de cemento y áridos naturales, machacados, cribados y procesados en plantas de reciclado dan lugar al material secundario “*árido reciclado de hormigón*.” Éste deriva de un solo tipo de material primario, el hormigón, cuya composición es heterogénea (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones). El material obtenido de esta forma no puede considerarse, por tanto, un material uniforme. Las diferencias en la composición pueden ser notables en función, principalmente, de la proporción de mortero presente en el residuo. Debido a esta pasta de mortero que tiene adherida el árido reciclado es un material poroso de gran capacidad de absorción, y esto influye sobretodo en la permeabilidad global del hormigón [1]. De hecho la capacidad de absorción es una de las propiedades más significantes que permite distinguir el árido reciclado del árido natural y puede influenciar las propiedades del hormigón tanto fresco como endurecido. Muchos estudios sugieren un límite del 30% de sustitución de árido reciclado para mantener los requerimientos estándar del 5% de capacidad de absorción de los áridos para hormigón estructural. [2]

La calidad de los áridos reciclados presenta una gran dispersión, ya que depende de numerosos factores, como pueden ser, entre otros, el grado de limpieza que presentan los áridos, las técnicas de procesamiento utilizadas o la calidad del hormigón de origen en el escombro. Otras características importantes en estos áridos son la presencia de terrones de arcilla, el contenido de impurezas o el contenido de desclasificados inferiores, por ello es necesario establecer una clasificación orientativa del tipo de áridos reciclados que se pueden encontrar para un posterior uso.

2.2 Tipos de áridos reciclados

2.2.1. *Árido reciclado cerámico:*

Árido que se obtiene por procesamiento de material predominantemente cerámico. El 85% de este árido debe tener una densidad seca superior a 1600 kg/m³ según la norma holandesa, para evitar materiales excesivamente porosos y ligeros [3].

2.2.2. *Áridos reciclados mixtos:*

Definido en la norma holandesa como un árido que deberá contener un porcentaje mayor del 50% de hormigón con una densidad seca superior a 2100 kg/m³ y no más del 50% de materiales pétreos reciclados de distinta naturaleza que el hormigón, incluyendo los cerámicos con una densidad seca mayor de 1600 kg/m³.

Muchas normativas no permiten el uso de estos dos últimos tipos en hormigón estructural. Este tipo de árido puede compararse al árido ligero. Su empleo aumenta el contenido de aire y obliga también a una relación agua/cemento (a/c) mayor. Adicionalmente, la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón pueden verse afectados muy negativamente [3].

2.2.3. *Árido reciclado de hormigón*

El único tipo de árido reciclado que puede ser admisible para hormigón estructural es el “*árido reciclado de hormigón*” que pese a tener un cierto contenido de material cerámico no tienen betún y eso ayuda a una mayor resistencia de la nueva interfase que se creará entre la nueva pasta de cemento y los áridos reciclados y deben imponérsele valores límites para las impurezas que puedan tener efectos negativos sobre la resistencia y durabilidad. El resto de tipos de áridos, como por ejemplo los áridos reciclados provenientes de la demolición de carreteras, que se encuentran en grandes cantidades y se caracterizan por un elevado contenido de impurezas no deseables, como betún y derivados podrían ser utilizados en otras aplicaciones, como por ejemplo capas de firmes de carreteras.

2.3. Propiedades del árido reciclado

2.3.1 *Granulometría*

La granulometría de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración que se realice, pudiéndose seleccionar mediante pequeños ajustes en la apertura de las machacadoras.

El porcentaje de árido grueso que se obtiene suele variar entre 70% y 90% del árido total producido. Este porcentaje depende además del tamaño máximo del árido grueso reciclado producido y de la composición del hormigón original. La fracción gruesa posee una curva granulométrica adecuada, que se puede englobar dentro de los husos granulométricos que recomiendan algunas

normas internacionales para el empleo de árido grueso en hormigón estructural (ASTM, prEN). [3]

2.3.1.1. Porcentaje de finos

El árido reciclado genera finos durante su manipulación debido a la aparición de pequeñas partículas de mortero que se desprenden. Según algunos ensayos españoles, la generación de finos sobre fracciones gruesas ya clasificadas en el laboratorio puede variar entre 0,27% y 1,14%, situándose en la mayoría de los casos por debajo del límite del 1% del árido grueso establecido por la EHE.

La presencia de partículas finas en la superficie del árido reciclado puede originar problemas de adherencia entre éste y la pasta de cemento, además de provocar un aumento en la cantidad de agua de amasado necesaria.

Las recomendaciones o normas que incluyen especificaciones sobre esta propiedad establecen un límite más alto de finos para el árido reciclado, admitiendo entre un 2% y un 5%, favoreciendo así el cumplimiento de esta especificación. [3]

2.3.2. Mortero adherido

El árido grueso reciclado posee una cierta cantidad de mortero adherido, que lo diferencia de los áridos naturales. Este mortero es el causante de las diferencias que existen entre las propiedades de un árido natural y un árido reciclado antes mencionadas: menor densidad, mayor absorción, susceptibilidad a las heladas, reacción álcali-árido y ataque de sulfatos, entre otros. Estas propiedades afectan, a su vez, negativamente a las del hormigón: módulo de elasticidad, retracción, fluencia y problemas asociados a la durabilidad. Cuanto mayor es el contenido de mortero adherido que presenta el árido reciclado, más lo acusará el hormigón fabricado con él [2].

2.3.3. Densidad y absorción

La densidad del árido reciclado es inferior a la del árido natural, debido a la pasta de cemento que queda adherida a los granos. La densidad del árido reciclado suele oscilar entre 2.100 y 2.400 kg/m³, mientras que la densidad saturada con superficie seca varía entre 2.300 y 2.500 kg/m³, por lo que en todos los casos se pueden considerar estos áridos de densidad normal (no ligeros), por presentar una densidad superior a 2.000 kg/m³, según establece la norma UNE 146.120:97 "Áridos para hormigones. Especificaciones". [3]

La absorción es una de las propiedades físicas del árido reciclado que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural, debido a la elevada absorción de la pasta que queda adherida a él. Los valores habituales de absorción están comprendidos entre 4-10%, incumpliendo en la mayoría de los casos el límite del 5% que establece la EHE.

Los principales aspectos que influyen tanto en la densidad como en la absorción del árido reciclado son:

Tamaño de partícula: las fracciones más pequeñas presentan menor densidad y una mayor absorción (para un mismo hormigón de origen) que las fracciones más gruesas debido a que en las primeras se concentra un mayor porcentaje de pasta.

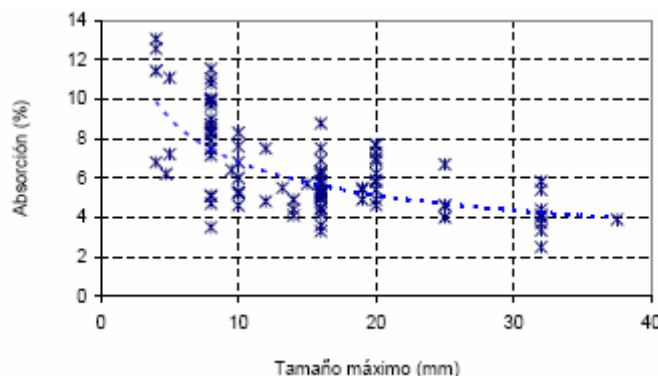


Figura 1: Relación entre el tamaño máximo del árido reciclado y su absorción [3].

Calidad del hormigón original: los hormigones de baja relación a/c (y por lo tanto de elevada resistencia), suelen dar lugar a áridos reciclados de mayor calidad, y por lo tanto con mayor densidad y menor absorción. Estudios realizados demuestran que una misma planta que procese hormigones de diferente calidad (10-50 N/mm²) puede producir áridos con un rango del coeficiente de absorción muy amplio (entre 10% y 5% respectivamente) [3].

Técnicas de procesado: cuando en el procesado del árido grueso reciclado se realizan sucesivas etapas de trituración, se elimina un mayor contenido de mortero y la calidad del árido mejora sustancialmente, observándose un descenso de la absorción y un incremento de la densidad, que pueden alcanzar valores próximos a los del árido natural.

Comparando el árido reciclado con el árido natural, se observa que la principal diferencia es la porosidad total, pues en algunos casos la porosidad del reciclado puede llegar a ser el doble que la del natural. Eso provoca un aumento de la permeabilidad global del hormigón, aunque los diferentes estudios certifican que la permeabilidad total disminuye con la edad del hormigón, por la formación de geles y cristalización de nuevos productos que poco a poco van densificando el conjunto [4]. Este efecto se evidencia sobretudo en los poros de radio < 30 nm, pues es en esta zona donde más se nota que la permeabilidad disminuye con la edad, aunque es necesario remarcar que con la introducción de árido reciclado crece también el tamaño medio de los poros que junto a las grietas que ya llevan los áridos hace que la permeabilidad sea considerablemente superior a la del árido natural.

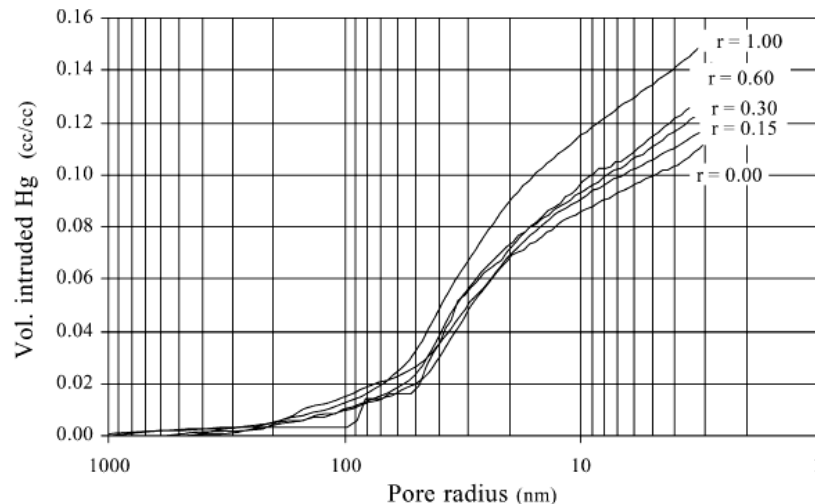


Figura 2: Afectación del tamaño de los poros. r=factor de sustitución [5].

2.4. Dosificación de hormigones con árido reciclado

Para la dosificación del hormigón reciclado, en principio se pueden emplear los métodos convencionales de dosificación, aunque se han desarrollado algunas experiencias específicas respecto a la utilización de áridos reciclados [3]

2.4.1. Contenido de agua

Para determinar el contenido de agua en la dosificación de hormigón con áridos reciclados, hay que tener en cuenta que la absorción de agua es mucho mayor en los áridos reciclados que en los convencionales, debido entre otros factores, al mortero adherido a los áridos originales. Así, se puede considerar que el hormigón reciclado elaborado con áridos gruesos reciclados y arena natural requiere entre un 5% y un 10 % más de agua que los hormigones producidos con áridos naturales para conseguir la misma consistencia [6],[7], lo que puede suponer que sea necesario un contenido adicional de agua próximo a 10 l/m³.

Para asumir este incremento en la demanda de agua se puede presaturar el árido o incrementar el agua de amasado. También es posible corregir este efecto mediante la utilización de aditivos.

2.4.2. Contenido de cemento

En principio, los tipos de cemento utilizados serán los mismos que se emplearían en un hormigón convencional para las mismas prestaciones.

Debido a la menor calidad del árido reciclado, para mantener la misma resistencia y consistencia, el hormigón reciclado necesitará un mayor contenido de cemento en su dosificación [3].

2.4.3. Criterios generales de dosificación

- Se deben realizar dosificaciones previas para ajustar la cantidad de agua para obtener la consistencia requerida, la relación agua/cemento para obtener la resistencia exigida y la proporción entre árido fino y grueso para alcanzar la cohesión del hormigón fresco.
- Para una misma consistencia, la demanda de agua del hormigón con árido grueso reciclado es del orden de 5-10 % mayor que para el hormigón convencional, para mantener la trabajabilidad.
- Debido a la mayor demanda de agua del hormigón con áridos reciclados, el contenido de cemento necesario será algo mayor para el hormigón con áridos reciclados que para el hormigón convencional. Se han desarrollado métodos específicos que han tenido en cuenta estos aspectos [2].
- Cuando se esté estimando la relación entre el árido fino y grueso, se debe tener en cuenta que la curva granulométrica de referencia para el árido reciclado es la misma que para el árido convencional.
- Si las dosificaciones son en peso se debe tener en cuenta la menor densidad del árido reciclado. Ésta se debe a la menor densidad del mortero adherido a las partículas de áridos reciclados [3].
- Debido a la alta capacidad de absorción, los áridos reciclados deben estar húmedos antes de su empleo. En caso contrario, absorberían agua de la pasta y se perdería trabajabilidad, además de perder el control de la relación agua/cemento efectiva [2].

2.5. Propiedades generales del hormigón fabricado con árido reciclado.

Las propiedades del hormigón reciclado pueden verse afectadas negativamente respecto a las de un hormigón convencional con la misma dosificación. El módulo de elasticidad y las resistencias pueden reducirse, y la retracción y fluencia pueden aumentar en comparación con hormigones de similares resistencias que contienen únicamente áridos naturales. En general la permeabilidad de los hormigones reciclados es más alta que la del hormigón convencional, tienen mayor capacidad de succión y resisten peor la exposición a temperaturas altas. Estas variaciones, debidas fundamentalmente al aumento de la cantidad de mortero adherido al árido, serán mayores a medida que se aumente el porcentaje de sustitución de árido natural por árido reciclado [8], [9], [10].

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

2.5.1. Consistencia

La incorporación total de grava reciclada seca en el hormigón produce en general un aumento de la consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento. Debido a la elevada absorción que presenta el árido reciclado, durante el proceso de amasado una cierta cantidad de agua será retenida por los áridos, generando un aumento de consistencia en ocasiones importante y una reducción de la relación agua/cemento efectiva. Así, el aumento de la demanda de agua se debe principalmente a la mayor absorción de los áridos reciclados y al cambio de granulometría del árido, fundamentalmente por generación de finos durante el amasado, aunque también pueden influir otros factores como su forma angular y su textura rugosa. Además, la pérdida de trabajabilidad es más rápida, ya que después del amasado el árido continúa absorbiendo agua. Esto presenta un problema cuando se trata de un hormigón fabricado en planta, para el que se produce un intervalo de tiempo entre la producción y la puesta en obra [3].

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

2.5.2. Resistencia de hormigón con áridos reciclados.

La reducción de la resistencia a compresión se puede observar en todos los hormigones en los que el árido natural ha sido sustituido por árido reciclado para la misma relación agua/cemento, es inferior a los convencionales, disminuyendo a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, y no sólo la resistencia, la reducción de las propiedades mecánicas del hormigón se hace más patente a medida que se aumenta la proporción de árido reciclado que sustituye al natural (Topcu and Guncan 1995; van Acker 1996; Teranishi et al. 1998) [8-10]. Más aún, la incorporación de áridos finos reciclados (arena reciclada) obtenidos siempre de la demolición y trituración de hormigón, según Hansen (1992) conlleva una reducción aún mayor de las propiedades mecánicas del nuevo hormigón [10].

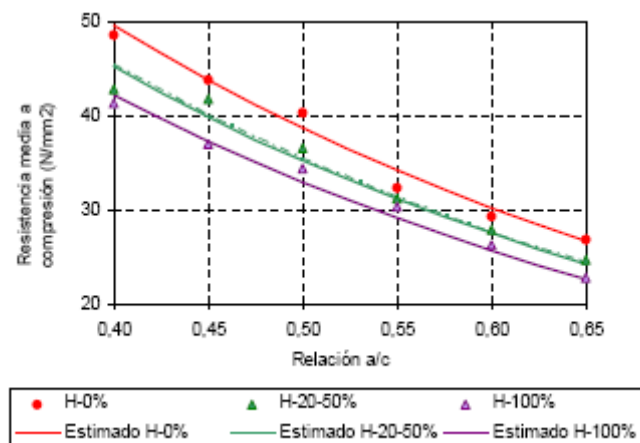


Figura 3: Relación resistencia media a compresión – agua/cemento total según curva de Abrams [3].

Como se observa en la figura 4, el aumento de la porosidad inducido por el árido reciclado es muy dañino para la resistencia a compresión del hormigón, como se puede observar en el siguiente gráfico de José M.V. Gómez-Soberón (2001) [5].

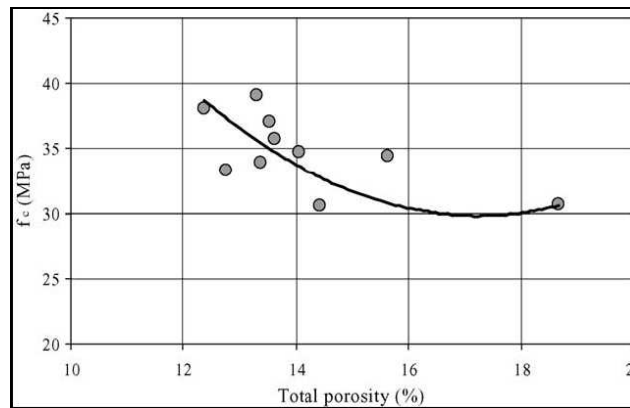


Figura 4: Porosidad total vs Resistencia a compresión [13].

2.5.2.1. Influencia del porcentaje de árido reciclado

Dado que la sustitución del árido fino natural por árido fino reciclado comporta graves pérdidas de propiedades mecánicas, se contempla únicamente la sustitución de árido grueso. Las pérdidas de resistencia, cuando se sustituye el 100% del árido grueso, suelen encontrarse alrededor del 20%, pudiendo alcanzar de forma puntual el 30%. Cuando la sustitución baja al 50%, las pérdidas de resistencia se sitúan en un 2-15%. La pérdida de resistencia suele ser inferior al 5% cuando la sustitución se limita al 20-30% [5].

2.5.2.2. Influencia de la calidad del hormigón de origen

La resistencia de los hormigones reciclados y de los convencionales aumenta con la disminución de la relación agua – cemento. Esta relación, conocida para el caso de los hormigones convencionales, no se puede aplicar directamente al caso de los hormigones reciclados, ya que en éstos la resistencia también depende de la calidad del árido reciclado utilizado.

Así, a partir de un árido reciclado de baja calidad (hormigón de origen de baja resistencia) se obtendrá un hormigón reciclado que presentará un valor en su resistencia, que no podrá ser superado aún disminuyendo la relación agua – cemento. Sin embargo, si el árido reciclado es de calidad alta (hormigón de origen de buena resistencia y buen estado) los hormigones reciclados resultantes pueden alcanzar resistencias cuya correspondencia con la relación agua / cemento es similar a la de los hormigones convencionales [11].

2.5.2.3. Influencia de la cantidad del mortero adherido

Las principales propiedades del hormigón reciclado dependen básicamente de la calidad del hormigón de origen, no de la cantidad del mortero adherido según Nobuaki Otsuki [11].

2.5.3 Porosidad, absorción y permeabilidad.

La presencia de agua es el principal factor en el deterioro del hormigón, con excepción del deterioro mecánico. El transporte de agua a través del hormigón viene determinado por el tipo, tamaño, distribución e interconexión de los poros y fisuras. Estos factores determinan la permeabilidad del hormigón y a su vez, ésta condiciona decisivamente la durabilidad. Una vez producida la entrada del agua desde la superficie mojada, ésta circula por el hormigón en función de su porosidad, transportando a su vez las sustancias agresivas disueltas.

La incorporación del árido reciclado en el hormigón representa un aumento de su porosidad, de su capacidad de absorción y de su permeabilidad, aunque el resultado final depende también de las características de la nueva matriz cementante.

Diferentes estudios [12] que han evaluado esta propiedad en hormigones con sustitución del árido grueso natural por árido grueso reciclado han obtenido un aumento del coeficiente de absorción de los hormigones reciclados comparados con los hormigones convencionales. Estos incrementos dependen de la porosidad del árido reciclado y del porcentaje de sustitución, y pueden variar entre el 15% y 70% respecto a la absorción del hormigón convencional

Otros estudios han comprobado que porosidad y permeabilidad aumentan con la inclusión de árido reciclado, siendo este efecto mucho más importante cuando se utilizan además las fracciones recicladas finas. El aumento de la porosidad en estos casos es de 1,5 a 2 veces mayor que la del hormigón de control. La permeabilidad es de 2 a 3 veces mayor que la del hormigón de control [13].

2.5.4 Resistencia a altas temperaturas.

Las altas temperaturas se pueden dividir en tres rangos en términos del efecto que tienen sobre la pérdida de resistencia del hormigón. Éstos rangos son de 20-400°C, 400-800°C y por encima de 800°C. En el rango 20-400°C, el hormigón convencional mantiene su resistencia original. En el rango 400-800°C, el hormigón pierde la mayoría de su resistencia original, especialmente a partir de los 600°C [14]. A temperaturas mayores de 800°C los efectos de la pérdida no son tan significativos como en el rango de 400-800, así que es en este rango donde el hormigón nota los efectos de las altas temperaturas, que es cuando el hormigón pierde masa. Los poros de mayor tamaño (>50 nm) se engrandecen todavía más, y éste efecto es más notable cuando trabajamos con árido reciclado.

Las resistencias a tracción y compresión disminuyen por la desintegración de la pch y el aumento en la porosidad total (sale más perjudicada la resistencia a tracción). El C-S-H queda muy dañado y a su vez la permeabilidad aumenta mucho debido al crecimiento de los poros de mayor tamaño [14], [15].

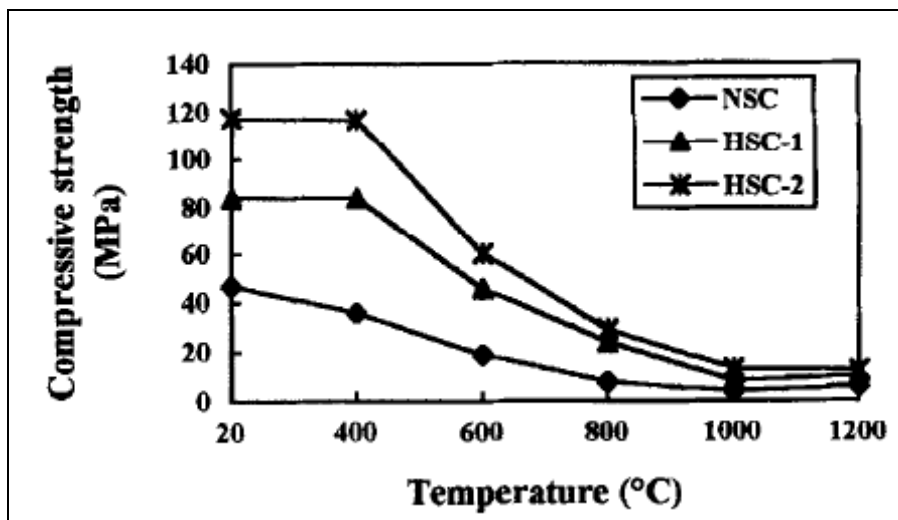


Figura 5: Evolución de la Resistencia a compresión del hormigón sometido a altas temperaturas (Y. N. Ghan et al.)

2.5.5. Carbonatación

Los estudios indican que la utilización de áridos gruesos reciclados de calidad y en pequeña cantidad, mantienen profundidades de carbonatación similares a las de los hormigones convencionales, mientras que para sustituciones elevadas se pueden alcanzar profundidades mayores [16].

La carbonatación está considerada un proceso dañino para el hormigón y sus propiedades, más aún si los áridos reciclados con que tratamos servirán para fabricar hormigón reforzado, pues la carbonatación provocaría la corrosión de las armaduras [17].

Aunque no existe uniformidad de criterios y valores en cuanto a la carbonatación y a su papel en las prestaciones del hormigón, en el presente estudio se intentará definir un criterio respecto al papel, beneficioso o no, de la carbonatación, pues se cree que induciendo la carbonatación de los áridos reciclados previamente a la fabricación del hormigón, puede resultar en una importante mejora de la permeabilidad del hormigón reciclado.

2.6. Propiedades del hormigón carbonatado.

El hormigón carbonatado presenta unas propiedades sustancialmente diferentes del hormigón no-carbonatado, según Ha-Won Song, 2005, se observa el aumento de la densidad, resistencia, modulo de elasticidad y retracción producidos por la carbonatación, y la magnitud de los cambios depende proporcionalmente del contenido de cemento [16].

La carbonatación provoca ciertos cambios visibles en el hormigón, además de los citados anteriormente, como por ejemplo cambios en el peso de las muestras, cambios en la absorción y saturación de humedad y en la difusividad del CO_2 [18].

La carbonatación de una muestra se dará con más facilidad en hormigones con una relación a/c alta puesto que ello implicará cierta permeabilidad que facilitará la difusión del CO_2 entre la estructura porosa de la masa, como se observa en la figura [16]

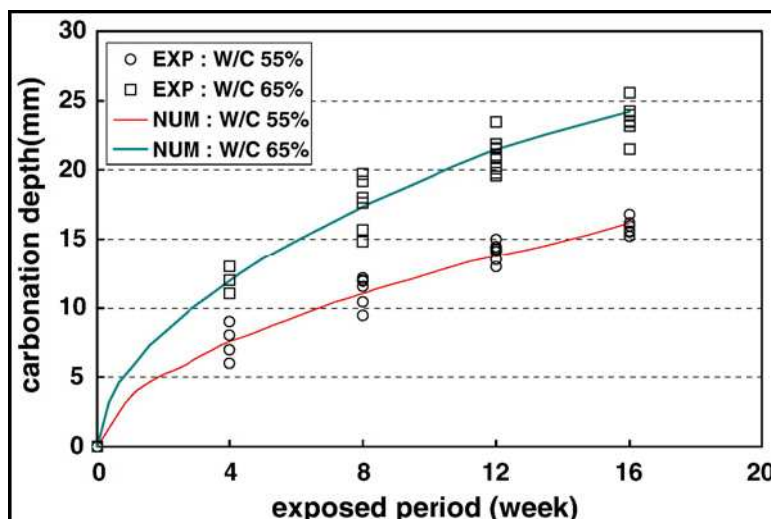


Figura 6: Evolución de la carbonatación con a/c. (Ha-Won Song et al. 2005)

2.6.1 Densidad

La carbonatación provocada en un hormigón hace variar principalmente la microestructura del mismo, y se demuestra que existe un aumento en la densidad de este hormigón, pues sube el volumen de hidratos y disminuye notablemente la porosidad [17].

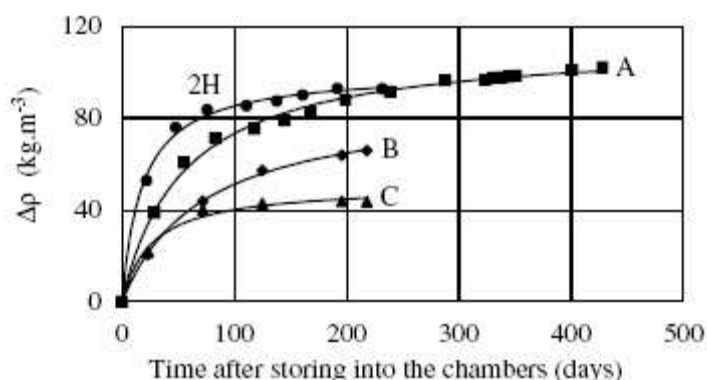


Figura 7: Aumento de la densidad según el tiempo de carbonatación. (Jan Jerga 2004)

2.6.2 Porosidad

A medida que aumenta el grado de carbonatación de una muestra, se aprecia una subida de la densidad y una bajada de la porosidad total de la pasta, pero se observa también un aumento de la porosidad capilar. La porosidad capilar es un aspecto interesante para la fabricación de hormigón armado, pues son los poros capilares los que conectan las vías internas del hormigón, favoreciendo la penetración de iones (Cl^- p.ej.) provenientes del exterior [19].

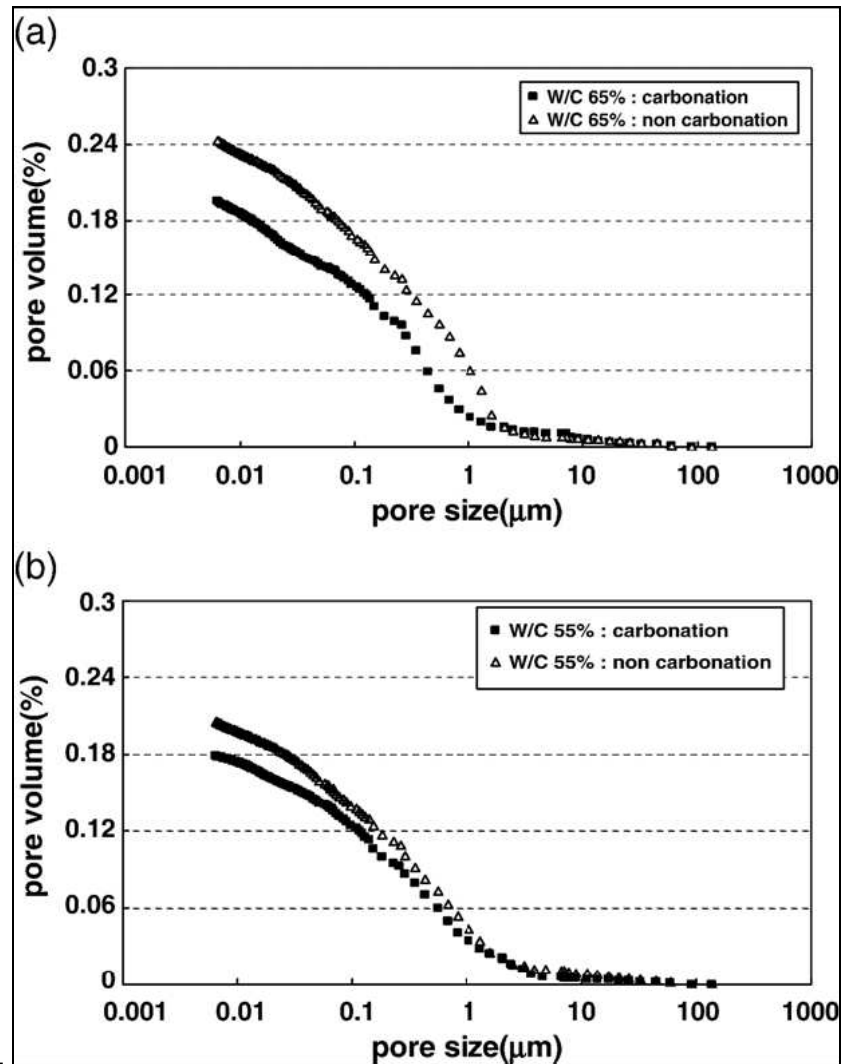


Figura 8: Relación entre el volumen y el tamaño de los poros
(Gómez-Soberón, 2002)

2.6.2.1 Carbonatación y Porosidad según el tipo de cemento

Con la carbonatación se reduce la porosidad total para todo tipo de cemento o mezcla cementicia (OPC, cenizas, *slag*...), pero dependiendo del tipo de mezcla cambian notablemente las medidas de los poros, afectando de una forma u otra a las propiedades del hormigón final [16].

En cualquier caso, se ha observado que en los cementos con mucho clinker la carbonatación implica siempre una considerable reducción del volumen total de poros.

2.6.2.1.1 OPC, Ordinary Portland Cement

Según los estudios realizados por V. T. Ngala, 2002, se reduce la porosidad total con la carbonatación, pero aumenta ligeramente la proporción de poros capilares de tamaño superior a 50 nm

2.6.2.1.2 Cenizas y Slag

También se consigue una reducción importante de la porosidad total del conjunto pero en este caso, con este tipo de mezclas cementicias la carbonatación aumenta mucho la proporción de poros > 50 nm, lo cual es muy negativo para las prestaciones finales del hormigón endurecido. Se crea una red de poros capilares de gran tamaño debido a la descomposición del gel de C-S-H en estas pastas de cemento. V. T. Ngala, demostró también que los cambios en el volumen total de poros y en el tamaño de los mismos dependen de la relación agua/cemento y del curado inicial [20].

2.6.2.2 Estructura de los poros

La estructura de los poros capilares se mantiene constante durante 28 días mientras se carbonata, pero si la carbonatación se mantiene constante pasado este tiempo, la estructura empieza a sufrir variaciones en tamaño y volumen.

Todas las propiedades importantes del hormigón están relacionadas con la porosidad; los poros grandes (>50 nm) son fatales para la resistencia y la permeabilidad.

El transporte de sustancias nocivas para el hormigón, como pueden ser cloruros o sulfatos, depende directamente de la distribución de tamaños, pues se da básicamente entre los poros de tamaño >50 nm [16].

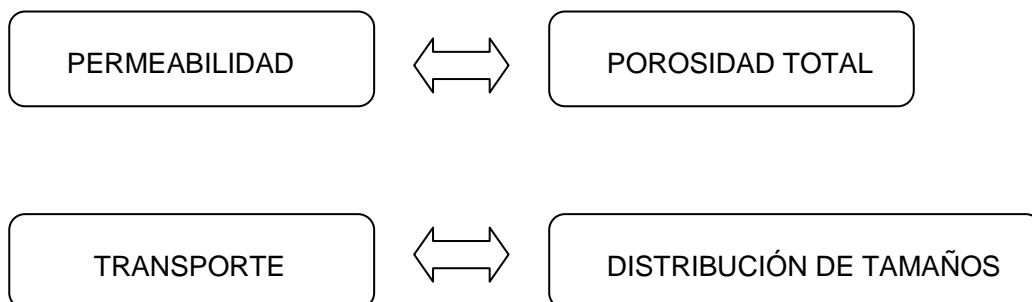


Figura 9: Relación entre porosidad y propiedades

2.6.3 Permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad baja con el tiempo y la edad del hormigón, y se observa que el flujo de agua es muy bajo para muestras muy carbonatadas.

Según la relación agua/cemento, a medida que aumenta a/c el índice de permeabilidad también aumenta como se observa en la figura 10 [16].

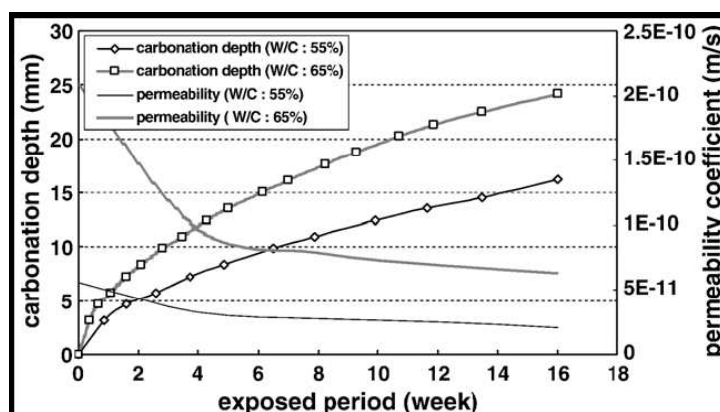


Figura 10: Efecto de la carbonatación en la permeabilidad [16].

Dado que está demostrado que la permeabilidad disminuye con la carbonatación, y además que se produce una cierta densificación del hormigón conjuntamente con una disminución del volumen total de poros por los efectos de dicha carbonatación, es lícito pensar que provocando la carbonatación en los áridos reciclados, de naturaleza porosa y muy permeables, se conseguiría mejorar la característica más problemática de los áridos reciclados, la porosidad y consecuente permeabilidad, y así mejorar ésta característica en el global de hormigones reciclados.

2.7. Comparación microscópica entre nac (natural aggregate concrete) y rac (recycled aggregate concrete).

A niveles microscópicos se estudia la zona de transición entre el árido reciclado y la pasta de cemento (*ITZ*, *interfacial transition zone*). Se ha demostrado que la ITZ influye de forma significativa en las propiedades del hormigón, pues generalmente es la zona más débil del conjunto y la fase que realmente limita la resistencia del hormigón [11].

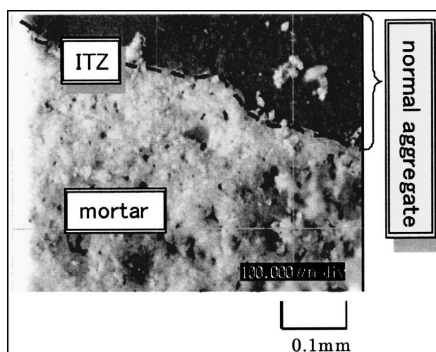


Figura 11: Antigua ITZ de los áridos reciclados [11].

Es por la presencia de la ITZ que el hormigón presenta una menor resistencia que la que presentan cada uno de sus componentes por separado (áridos y pasta de cemento). Es por ello que la ITZ debe ser considerada cuando se trata de estudiar la resistencia y durabilidad del hormigón. Particularmente en el hormigón fabricado con áridos reciclados encontramos muchas más ITZ que en el normal, como se observa en la figura, donde se puede ver la ITZ entre el árido original y el mortero adherido (antigua ITZ), y una segunda ITZ entre el mortero adherido y la nueva pasta de cemento (nueva ITZ).

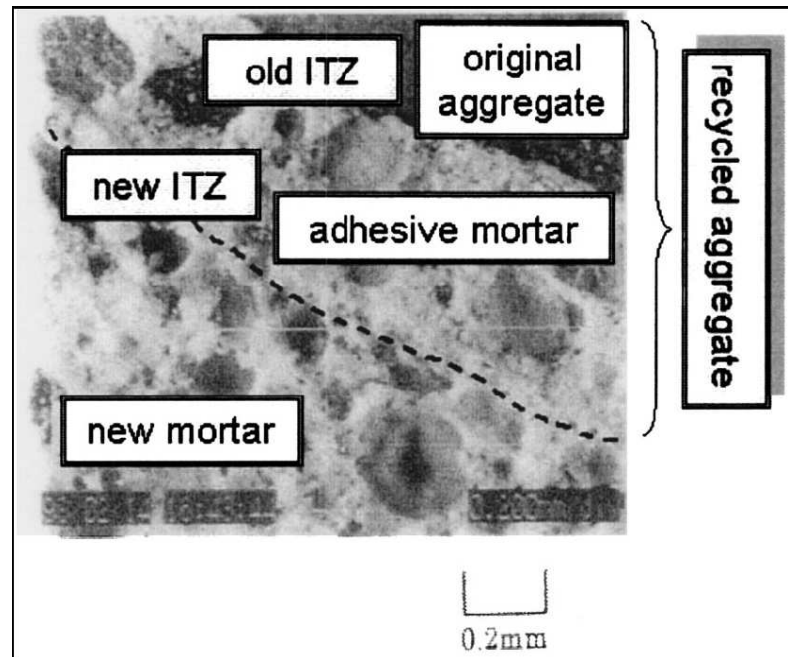


Figura 12: Antigua y nueva ITZ de los áridos reciclados [11].

En el estudio del hormigón fabricado con áridos reciclados, se ha demostrado que hay mucha relación entre la ITZ y la relación agua/cemento [11]. En el caso de una relación a/c alta, la nueva ITZ será más débil que la antigua (del hormigón original), y la resistencia del árido reciclado será igual que la del árido natural. Por otro lado, con una relación a/c baja, la nueva ITZ será más resistente que la antigua y eso hace que la resistencia del árido reciclado sea peor que la del árido natural.

3. FASE EXPERIMENTAL

3.1. Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento seguido para la fabricación de los diferentes tipos de hormigones reciclados. El estudio partió de la caracterización de los materiales a utilizar en la fabricación de los diferentes hormigones. Una vez caracterizados, se procedió a la fabricación de hormigones de diferentes dosificaciones manteniendo el porcentaje de cemento y de agua pero reduciendo el porcentaje de árido grueso natural a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado (la arena nunca se sustituyó por arena reciclada, se usó siempre arena natural). Los porcentajes de sustitución del árido reciclado para cada tipo de hormigón estudiado fueron 0%, 20%, 50% y 100%.

Como se ha explicado anteriormente, el estudio se basó en la ejecución de 5 fases experimentales. Exceptuando los áridos reciclados, los otros materiales se mantienen constantes en cada fase, es decir, se usa el mismo cemento, grava y gravilla en cada fase. La arena utilizada en las fases 1 y 2 se tuvo que cambiar a partir de la fase 3, lo que ocasionó diversos problemas, como se verá seguidamente.

- FASE 1: Proyecto RECHNOR, áridos presaturados, fabricación de dos tipos de hormigón, de relaciones agua/cemento 0,65 y 0,50 respectivamente.
- FASE 2: Áridos sin presaturar y con un alto porcentaje de betún, resistencia característica de relación a/c 0,5.
- FASE 3: Áridos sin presaturar, con bajo porcentaje de betún, resistencia característica de relación a/c 0,5.
- FASE 4: Áridos sin presaturar y no-carbonatados, resistencia característica de relación a/c 0,5.
- FASE 5: Áridos sin presaturar y carbonatados, relación a/c 0,5.

A medida que se ejecuta cada fase experimental, se analizan a 28 días las diferentes propiedades mecánicas (compresión, tracción indirecta i módulos

elásticos) así como la permeabilidad, absorción superficial y resistencia al fuego (éstas últimas dependiendo de la disponibilidad del hormigón) obtenidas por los hormigones. Las diferentes fases están dispuestas de modo que cada una intenta mejorar bajo condiciones teóricas las propiedades obtenidas en la fase anterior manteniendo la misma trabajabilidad en todos los morteros frescos para poder utilizar estos resultados en la aplicación del árido reciclado en la fabricación de hormigones.

3.2. Caracterización de los materiales

A continuación se muestran las propiedades más importantes de cada uno de los materiales utilizados en la fabricación de los hormigones.

3.2.1. Cemento

Se ha utilizado en todos los casos un cemento CEM-I 42,5 N/SR para la fabricación de hormigones. Se decidió seleccionar este tipo de cemento por las siguientes razones:

Uno de los hitos a cubrir por la ETS de Caminos de Barcelona es la sensibilidad al ataque por sulfatos de los hormigones reciclados por lo que era necesario el uso de este tipo de cemento. Uno de los hitos a cubrir por el CEDEX es el estudio de la carbonatación en el hormigón reciclado y algunos estudios han demostrado que la profundidad de carbonatación aumenta hasta en un 50% con el uso de cementos SR. Además, la mayor demanda de agua del árido reciclado provoca en general una mayor consistencia en el hormigón, con la utilización de este tipo de cemento mejoramos la fluidez del mismo.

Los ensayos de caracterización de los dos tipos de cemento empleados en el estudio experimental se recogen en la tabla 1:

Tabla 1: caracterización del cemento CEM-I 42,5 N/SR utilizado y requisitos según RC-03

CEM I 42,5 N/SR	NORMA	RESULTADOS	REQUISITOS RC-03
Densidad real	UNE 80103:1986	3,22 t/m ³	-
Fraguado inicial	UNE-EN 196-3:2005	275 min	≥ 45 min
Fraguado final	UNE-EN 196-3:2005	305 min	≤ 12 horas
Estabilidad de volumen	UNE-EN 196-3:2005	1,3 mm	≤ 10 mm
Resistencia a 2 días	UNE-EN 196-1:2005	24,5 N/mm ²	≥ 10 N/mm ²
Resistencia a 28 días	UNE-EN 196-1:2005	57,7 N/mm ²	≥ 42,5 N/mm ²
Escurecimiento	UNE 83258:2005	93 %	-

3.2.2. Áridos

A continuación se presenta la caracterización de los diferentes áridos utilizados en la fabricación de los hormigones.

3.2.2.1. Arena, grava y gravilla natural

En cuanto a la arena se trata de una arena caliza proporcionada por Madrid como parte del seguimiento del proyecto RECHNOR. La arena, la grava y gravilla natural presentan la siguiente granulometría:

Tabla 2: Granulometría de la arena, grava y gravilla naturales utilizadas

TAMIZ	% QUE PASA		
mm	ARENA	GRAVA	GRAVILLA
63	100	100	100
32,5	100	100	100
16	100	79	100
8	100	4	73
4	98	0	8
2	72	0	1
1	46	0	1
0,5	29	0	1
0,25	18	0	1
0,125	12	0	1
Densidad real	2,58	2,72	2,73
Absorción	3,5	1,95	2,54

En la figura 13 podemos ver las curvas granulométricas de los áridos empleados. La granulometría de todos los áridos naturales es adecuada para su utilización en la fabricación de hormigones.

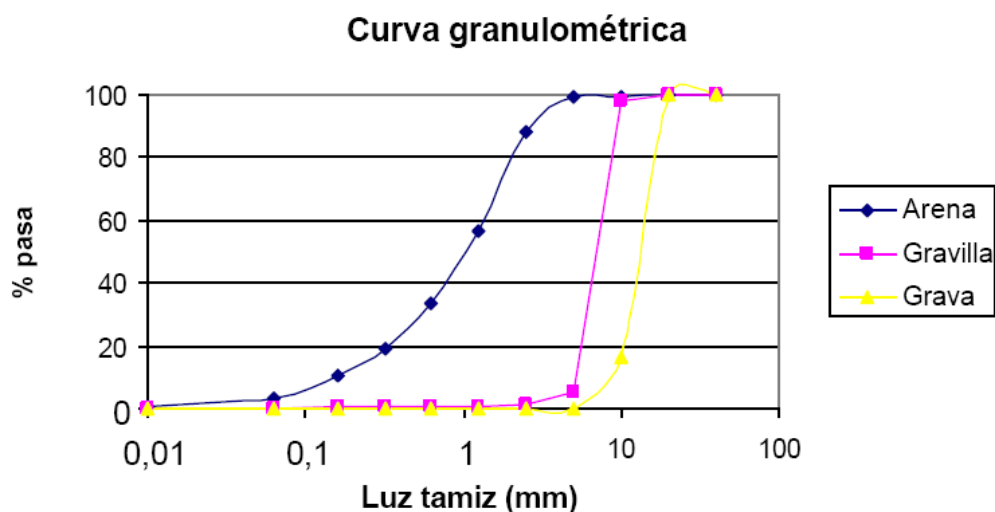


Figura 13: Granulometría áridos para la fabricación de hormigones

3.2.2.2 Árido reciclado

Para la ejecución de las fases 1 y 2 se ha utilizado el mismo árido reciclado, al que llamamos *árido TIPO M* proporcionado por el Proyecto RECHNOR con sede en Madrid. La diferencia entre las fases 1 – 2 y la fase 3 es el contenido de betún, pues el árido usado es el mismo pero se le ha extraído manualmente el contenido de betún. Esta acción se ha llevado a cabo porque el árido TIPO M tiene un porcentaje de betún superior al dictado por la Norma. En las fases 1 y 2 se ha usado el árido con alto porcentaje de betún. En La fase 3 se extrajo manualmente el betún existente en el árido reciclado y se determinaron de nuevo las propiedades de dicho árido, árido TIPO B. Para la realización de las fases 4 y 5, se utilizó otro tipo de áridos reciclados, proporcionados por TecnoCatalana de Runes S.A. para un mejor estudio de su afectación en el hormigón. La característica principal de estos áridos, TIPO F es que han sido obtenidos de la demolición directa de hormigón, el contenido de betún es nulo y están no-carbonatados. Las propiedades de los áridos se reflejan en la tabla 3.

Tabla 3: propiedades físicas de los diferentes tipos de áridos.

PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS	ÁRIDO TIPO M	ÁRIDO TIPO B	ÁRIDO TIPO F
Densidad de partículas aparente	2,60	2,6	2,60
Densidad d partículas tras secado en estufa	2,33	2,28	2,35
Densidad de partículas s.s.s	2,3	2,41	2,5
%porosidad saturada	10,34%	12,65%	9,9%
%porosidad neta	11,53%	14,5%	11,03%
%compacticidad	89,65%	87,35%	90,06%
Absorción	4,43	5,55	4,22
Humedad	0,75	1,3	3,99

En las Fases 1 y 2 se ha utilizado árido *Tipo M*. Tras realizar varias pruebas de absorción de dicho árido se pudo comprobar que efectivamente el árido reciclado tiene mucha más capacidad de absorción, y que al presaturar los áridos, gran cantidad del agua se queda en la superficie del árido natural, mientras que en el árido reciclado no existe tanta agua superficial, más de la mitad del agua es absorbida, como se observa en la tabla 4.

Tabla 4: Cantidad (% respecto al peso de la muestra) de H₂O absorbida por el árido en 10' tras saturar y tras secar la superficie, en el árido natural y Tipo M (Fases 1 y 2).

MUESTRAS	H ₂ O absorbida en 10' (%)	H ₂ O absorbida en 10' tras secar superficie (%)	% H ₂ O superficial
Grava natural (1)	2,719	0,15	94,7 %
Grava natural (2)	2,94	0,14	95,1 %
A.R (TIPO M) (1)	3,95	1,98	42,62 %
A.R (TIPO M) (2)	4,26	2,41	43,38 %
A.R (TIPO M) (3)	4,89	2,98	38,97 %
A.R (TIPO M) (4)	3,80	2,41	36,38 %
A.R (TIPO M) (5)	3,81	1,63	57,28 %

La norma EHE especifica ciertas propiedades que deben cumplir los áridos para su uso como agregado mineral en el hormigón. Las siguientes especificaciones se utilizarán como criterio inicial para su aceptación en el estudio llevado a cabo. En la tabla 5 se recogen una serie de especificaciones recomendadas para el árido natural y el árido reciclado.

Tabla 5: Especificaciones recomendadas para el árido natural y el árido reciclado según EHE.

	ÁRIDO RECICLADO	ÁRIDO NATURAL
Absorción	< 7%	< 4,5%
Terrones de arcilla	< 0,6%	< 0,16%
Impurezas:		
Ladrillo	< 5%	-
Asfalto	< 1%	-
Otras impurezas (plástico, vidrio, papel, etc)	< 1%	-
Porcentaje de arena (< 4 mm)	< 7,5%	< 4,4%

En la tabla 6 se puede apreciar las diferencias más sustanciales en referencia a los componentes de cada tipo de árido. Se observa que el árido *tipo M* tiene un alto porcentaje de betún, por ello se decidió llevar a cabo la fase 3, extrayendo manualmente el betún.

Tabla 6: Componentes de los áridos (% sobre el peso total).

COMPONENTES DE LOS ÁRIDOS	ÁRIDO TIPO M	ÁRIDO TIPO B	ÁRIDO TIPO F
ÁRIDO RECICLADO	68,89%	74,10%	78%
ÁRIDO NATURAL	21,03%	25,3%	22%
CERÁMICA	0,71%	0,60%	0
BETÚN	9,29%	0	0
MATERIA ORGÁNICA	0,1%	0	0

Resumiendo, se ha trabajado con tres tipos de áridos que han permitido un estudio más amplio de las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados:

- **Fases 1-2:** Árido *TIPO M*, árido reciclado con alto porcentaje en betún. Los áridos ya estaban carbonatados antes de su uso.
- **Fase 3:** Árido *TIPO B*, mismo esqueleto mineral que el árido *TIPO M* pero sin contenido de betún.
- **Fases 4-5:** Árido *TIPO F*; árido reciclado sin betún. Dado su origen, de hormigón sin contaminar, no estaban carbonatados, lo que permite una buena comparación entre el uso de árido carbonatado y sin carbonatar. Se usa fenolftaleína como indicador para determinar el grado de carbonatación de un árido. El color liloso que adquiere éste indica que no hay muestras de carbonatación en ese árido. Por el contrario si está carbonatado el tintado será muy débil o casi imperceptible tras la aplicación de la fenolftaleína, como se observa en la figura 14, donde, de

derecha a izquierda, vemos un árido sin carbonatar (color lila), un árido a media carbonatación y un árido ya carbonatado (sin color).



Figura 14: Determinación del grado de carbonatación mediante fenolftaleína

El árido *tipo M* y *tipo B* presentan la misma granulometría diferente a la del árido *tipo F*, en la tabla 7 se presentan las 2 granulometrías:

Tabla 7: Granulometría de los diferentes tipos de áridos utilizados

TAMIZ	% QUE PASA	
	TIPO M - B	TIPO F
mm		
63	100	100
32,5	100	100
16	88	78,39
8	10	29,34
4	0	1,83
2	0	0
1	0	0
0,5	0	0
0,25	0	0
0,125	0	0

En la figura 15 podemos ver las curvas granulométricas de los áridos reciclados utilizados en este estudio.

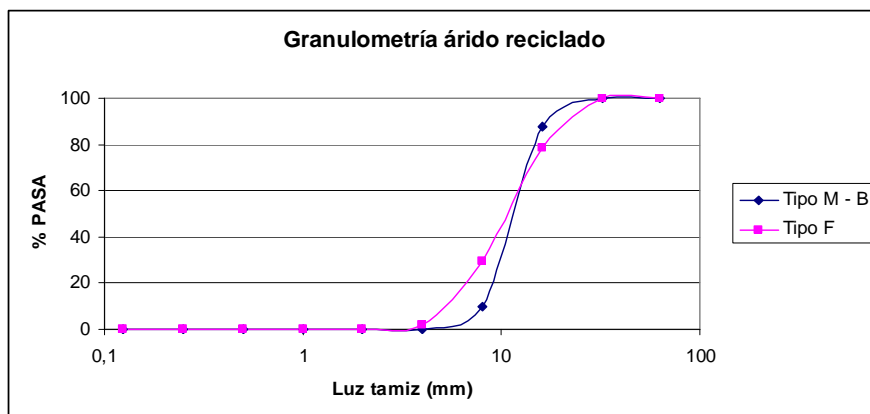


Figura 15: Granulometría áridos reciclados para la fabricación de hormigones

3.2.3. Aditivo

Se utilizó el aditivo SIKAMENT 500 HE. Se trata de un aditivo superplastificante exento de cloruros. Cumple la norma UNE-EN934-2. Composición química: copolímeros vinílicos modificados y agentes orgánicos minerales. Dosificación recomendada entre 0,7% y 2% del peso de cemento, Densidad: 1,15 kg/l.

3.3 Fabricación y curado de las probetas

Se siguieron las especificaciones de la norma española UNE 80-101-88 o la norma europea EN 196-1 tanto en el tamaño y características de las probetas, como en el propio proceso de fabricación y conservación de las mismas, que se detallan en los siguientes apartados de este capítulo.

Según la Fase ejecutada, se fabricaron un tipo de probetas u otras, dependiendo de los ensayos a realizar sobre ellas, de ésta forma se optimizó la cantidad de hormigón para realizar las pruebas pertinentes en cada caso.

- Fase 1: Al tratarse de una Fase enfocada al Proyecto RECHNOR las pruebas a realizar son más específicas, por ello se fabricaron probetas cilíndricas, de tamaños 15x30 cm. y 10x20 cm. en los moldes de acero disponibles en el laboratorio.
- Fases 2-3-4-5: Además de fabricar las mismas probetas cilíndricas que en la fase 1, se aumentó la cantidad de hormigón y se fabricaron también probetas cúbicas de 10x10 cm.

En la figura 16 se aprecian los tres tipos de probetas utilizadas para la realización de todos los ensayos:



Figura 16: Tipos de probetas fabricadas, cúbicas, cilíndricas 15x10 y cilíndricas 30x15.

Para cada tipo de hormigón se fabricaron series de probetas con sustitución respectivamente de un 20, un 50 y un 100% del árido natural por árido reciclado. En la tabla 8 se resume el número de amasadas de cada fase y la cantidad de probetas obtenidas en cada amasada:

Tabla 8: Recuento de probetas fabricadas

	25 MPa	40 MPa
FASE 1 (proyecto RECHNOR)	3 Cilíndricas de 15x30cm. 6 Cilíndricas de 10x20cm.	3 Cilíndricas 15x30 cm. 6 Cilíndricas de 10x20cm
FASE 2	NO	3 Cilíndricas 15x30 cm 11 Cilíndricas de 10x20cm 8 cúbicas de 10x10 cm.
FASE 3	NO	3 Cilíndricas 15x30 11 Cilíndricas 10x20 8 cúbicas 10x10
FASE 4	NO	3 Cilíndricas 15x30 11 Cilíndricas 10x20 8 cúbicas de 10x10
FASE 5	NO	3 Cilíndricas 15x30 11 Cilíndricas de 10x20 8 cúbicas de 10x10

En total, se fabricaron 21 mezclas que suponen 8 series de 9 probetas cada una más 4 series de 22 probetas y 9 series de otras 22 probetas cada una, lo que suma un total de 358 probetas de mortero.

3.3.1. Dosificación

Como ya se ha dicho, se fabricaron probetas cilíndricas y prismáticas de mortero, con una relación agua/cemento de 0,65 (resistencia característica 25MPa) y $a/c = 0,5$ (resistencia característica 40 MPa).

La cantidad de hormigón fabricada en las fases 1 y 2 fue de 26 litros, mientras que en las fases 3, 4 y 5 se fabricaron 35 litros, dado que el número de ensayos a realizar es mayor y por tanto se necesitaron más probetas.

3.3.2. Amasado

- ASTM C 192/C 192M-95 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

Se humedece el interior del tambor de la hormigonera y se añaden los áridos de mayor a menor tamaño con una pequeña cantidad del agua de amasado. Se dan dos vueltas a la hormigonera para extender los áridos, añadiendo después el árido fino y el cemento.

Se pone en marcha la hormigonera iniciándose el tiempo de amasado. Con la hormigonera en marcha se va añadiendo despacio el agua restante dejando una pequeña cantidad que se introduce posteriormente mezclada con el aditivo.

El amasado se realiza en los siguientes tiempos: 3 minutos de amasado, 3 minutos de reposo y 2 minutos más de amasado.

El aditivo se incorpora disuelto en una pequeña cantidad del agua de amasado que se reservó al iniciarse los 2 últimos minutos de amasado.

Al iniciarse el amasado se mide la temperatura y humedad ambiental y durante el periodo de reposo y tras los 2 últimos minutos de amasado se mide la temperatura del hormigón.



Figura 17: Imágenes del proceso de amasado del hormigón (a)



Figura 18: Imágenes del proceso de amasado del hormigón (b).

3.3.3. Medida de la consistencia por el método del Cono de Abrams

-UNE- EN 12350-2: 2006 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

Inmediatamente después de los últimos 2 minutos de amasado se mide la consistencia, mediante el cono de Abrams (ver apartado 4.2.1)

3.3.4. Llenado de probetas, compactación y conservación

-UNE-EN 12390-2:2001 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

Una vez amasado, debemos introducir el hormigón en los moldes para su conservación en la cámara húmeda. Previamente al llenado de las probetas, las paredes y bases de los moldes se impregnan de un producto adecuado que facilite su posterior desmolde. El proceso de enmoldado consiste en la introducción de la pasta en los moldes en 2 tongadas cada una de las cuales deberá ser compactada con 25 golpes de la misma barra que hemos utilizado anteriormente para la medida de la consistencia. Además deberemos golpear los moldes por su parte exterior con una maza con el objetivo de expulsar el aire ocluido en el hormigón. Finalmente deberemos enrasar perfectamente cada uno de los moldes para que la cara superior sea lo más lisa posible.

3.3.4.1. Compactación

La compactación se efectúa inmediatamente después del vertido del hormigón en el molde, de forma tal que se obtenga una compactación completa sin una excesiva segregación, ni aparición de flujo de lechada en exceso.

Las probetas son compactadas en un número mínimo de dos capas, con un espesor superior a 100 mm.

- Compactación con barra de compactar: Los golpes se distribuyen de una manera uniforme sobre la sección transversal del molde. El hormigón se vierte en los moldes en un número mínimo de capas según las dimensiones de las probetas, de compactar cada capa, se golpea lateralmente el recipiente, de forma cuidadosa, con el mazo hasta que las burbujas de aire mayores cesen de aparecer en la superficie y se hayan eliminado las depresiones dejadas por la barra de compactar.

3.3.4.2. Conservación, desmolde y transporte de las probetas

- Las probetas se mantienen en los moldes cubiertas por una arpillera húmeda, de forma que la temperatura esté comprendida entre 16°C y 27°C.
- Las probetas se mantienen en los moldes al menos 16 horas, pero no más de 3 días
- Una vez extraídas del molde las probetas se marcan de forma que no se alteren las superficies que han de estar en contacto con los platos de la prensa de ensayo.

- Transcurridas las 24 horas, las probetas se transportan a la cámara húmeda, donde se almacenan hasta la realización de los ensayos. La cámara húmeda se mantiene en condiciones estacionarias de 21°C y casi el 100% de humedad.

3.3.4.3. Refrentado

El refrentado de las probetas se realiza con Mortero de azufre. Se realiza una mezcla compuesta en partes iguales en peso de azufre y arena silíceo fina (la mayor parte que pase por el tamiz de 250 µm y que sea retenida por el tamiz de 125 µm conforme a la Norma ISO 3310-1).

3.3.5. Marcado de las probetas

Se estableció un código para clasificar las probetas y saber en qué momento se debían retirar de la cámara húmeda (donde se realizó el curado con unas condiciones de 21°C y 100% de humedad) para realizar los correspondientes ensayos.

El criterio ha sido el siguiente:

- Para la fase 1, correspondiente al Proyecto RECHNOR, las probetas de mortero se marcaron tras ser desmoldadas según el porcentaje de sustitución de árido reciclado, haciendo distinción entre la relación agua/cemento de 0,65 y 0,5. El porcentaje se marcó de la siguiente forma:
 - HC: Hormigón convencional fabricado con áridos naturales sin sustitución de árido reciclado.
 - HR20: Sustitución del 20% en peso del árido por árido reciclado.
 - HR50: Sustitución del 50%.
 - HR100: Sustitución del 100% del árido natural por árido reciclado.

En esta primera fase las probetas se marcaron además con las siglas MAD, haciendo referencia al proyecto RECHNOR de Madrid.

- Para la fase 2 el sistema seguido fue el mismo, distinción entre los porcentajes de árido reciclado y las siglas BCN (de Barcelona), ya que la fase 2 es una adaptación a la Fase 1 de Madrid. Se incluyó además las siglas F2.
- Para las siguientes fases 3, 4 y 5 el sistema de porcentajes fue el mismo, sin distinción entre Madrid o Barcelona, simplemente las siglas F3, F4 y F5 respectivamente.

3.4. Programa de fabricación

El proceso de fabricación ha sido el mismo en cada fase, exceptuando la primera de ellas donde hubo que presaturar los áridos, tanto naturales como reciclados para ampliar el campo de investigación según el proyecto RECHNOR.

Uno de los objetivos de este estudio es determinar cómo afecta la metodología de fabricación del hormigón en sus propiedades finales, y definir la mejor estrategia al respecto, por ello se explica detalladamente el proceso de fabricación de cada fase.

Seguidamente se detallan los procedimientos seguidos para la realización de cada fase:

3.4.1. FASE 1

3.4.1.1. Presaturación de los áridos

En cada amasada se presatura el árido grueso y el árido fino deberá tener una humedad por debajo del 0.3%.

El procedimiento seguido para la presaturación del árido grueso; grava, gravilla y árido reciclado *Tipo M* es el siguiente:

- Se pesan por separado la grava, la gravilla, el árido reciclado y las impurezas y se introducen en un bidón perforado, que permite la salida del agua, pero con aberturas lo suficientemente pequeñas para que no permitan la pérdida del árido.
- Se sumerge durante 10 minutos dentro de otro recipiente con agua. De esta forma se consigue que el árido reciclado absorba aproximadamente un 75% de su capacidad, y el árido natural absorba un 20%, aproximadamente a su condición de saturado con superficie seca.
- Después de este tiempo se eleva el bidón que contiene el árido, y se deja escurrir durante otros diez minutos, tiempo suficiente para el que el árido pierda el agua superficial.
- Para controlar la cantidad de agua absorbida se pesa el bidón con el árido seco y posteriormente tras los 10 minutos en los que se elimina el agua superficial.

Tras ejecutar el proceso anterior se fabricaron 8 hormigones diferentes, 4 de ellos de relación a/c 0,65 y los otros 4 con relación a/c 0,5, ambos con sustitución gradual del árido natural por el árido reciclado. Los porcentajes de sustitución fueron 0%, 20%, 50%, y 100% respectivamente. El procedimiento seguido en la fabricación es el descrito en el *apartado 3.3*.

En la dosificación vemos como el agua efectiva disminuye a medida que se añade árido reciclado al hormigón, ya que al ser más poroso absorbe más agua de la mezcla, y la relación a/c total aumenta con el árido reciclado.

En la fase 1 se decidió tomar medidas del agua absorbida por los áridos tras 10 minutos de presaturación en el proceso de amasado. En la tabla 9 vemos como a medida que aumentamos la sustitución de árido reciclado, el conjunto de agua absorbida + superficial será mayor.

Tabla 9: % H₂O (absorbida + superficial) introducida en la presaturación.

FASE 1	H ₂ O (absorbida + superficial) introducida en la presaturación. (% respecto al peso del árido)			
	HC	HR 20	HR 50	HR 100
a/c = 0,65	3,37	4,27	5,29	6,27
a/c = 0,5	3,50	2,53	4,97	5,96

El agua libre en el momento de hacer el ensayo de consistencia afectará en gran medida el asiento en la prueba del cono de Abrams. En la fase 1 se decidió tomar medidas del agua absorbida por los áridos tras 10 minutos de presaturación. Veamos como a medida que aumentamos la sustitución de árido reciclado, el agua absorbida será mayor, habrá más agua libre pero la relación a/c efectiva será menor. La disminución no es muy sustancial, pero eso podría ayudar a determinar el porqué de los resultados obtenidos tanto en los ensayos del hormigón fresco como en los del hormigón endurecido.

3.4.1.2. Dosificación Fase 1

Los pesos de cemento y agua se mantienen constantes para cada tipo de hormigón, en el caso de la fase 1. La relación agua/cemento efectiva con que se fabricará los hormigones se detalla en la tabla 8, así como los pesos secos de cemento y agua para 1 m³ de hormigón. Dosificación para 1 m³ de hormigón de relación a/c 0,65:

Tabla 10: Dosificación H25 (a/c=0,65), Fase 1. Pesos en kg.

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva	a/c total
HC	275	178,75	947,89	489,95	512,57	0,00	0,649	0,77
HR 20	275	178,75	961,33	361,61	378,31	184,98	0,640	0,786
HR 50	275	178,75	977,94	199,36	208,57	407,93	0,6262	0,799
HR 100	275	178,75	1009,59	0,00	0,00	639,83	0,604	0,806

Dosificación para 1 m³ de hormigón de relación a/c 0,5 (tabla 11):

Tabla 11: Dosificación H40 (a/c=0,5), Fase 1. Pesos en kg.

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva	a/c total
HC	380	190	806,43	329,67	701,55	0,00	0,50	0,582
HR 20	380	190	813,15	245,26	521,93	191,80	0,50	0,595
HR 50	380	190	821,75	136,44	290,35	426,79	0,495	0,609
HR 100	380	190	835,96	0,00	0,00	683,05	0,484	0,620

3.4.2. FASE 2

Tras pesar por separado cada uno de los componentes del hormigón, se fabricaron cuatro hormigones de resistencia relación a/c 0,5, con sustituciones de árido reciclado *Tipo M* de 0 (HC), 20 (HR20), 50 (HR50) y 100% (HR100) respectivamente. La diferencia de la Fase 2 respecto a la Fase 1 es que no se presaturaron los áridos previamente a la fabricación del hormigón, pues uno de los objetivos de este proyecto es demostrar la influencia de la metodología de fabricación/trabajo. Cabe destacar que tanto en la Fase 2 como en las siguientes los hormigones que se fabricaron son de relación agua/cemento de 0,5 (relación agua/cemento 0,5), de esta forma será más fácil analizar y comparar los resultados obtenidos tras los ensayos de cada fase. El proceso de fabricación de los hormigones es el descrito en el apartado 3.3.

3.4.2.1. Dosificación Fase 2

La dosificación se hace para 1 m³ de hormigón de relación a/c 0,5, con los pesos secos, pero tras detectar que en los áridos, tanto naturales como reciclados había cierta humedad causada por estar almacenados al aire libre, se decide calcular la humedad de los componentes justo antes de fabricar el hormigón, y con ello hacer la dosificación teniendo en cuenta esta humedad en los áridos y la arena.

Tabla 12: Dosificación 1 m³ de hormigón H40 (a/c=0,5), Fase 2. Pesos secos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva
HC	380	190	806,43	329,66	701,54	0	0,5
HR 20	380	190	813,14	245,26	521,93	191,79	0,5
HR 50	380	190	821,75	136,44	290,35	426,79	0,5
HR 100	380	190	835,96	0,00	0,00	683,05	0,5

La dosificación con los pesos húmedos ajusta el pesaje de los componentes a la realidad de sus propiedades físicas, teniendo en cuenta la humedad y la capacidad de absorción de cada uno, así se puede mantener la relación agua/cemento efectiva.

De esta forma, la dosificación con pesos húmedos para 1m³ de hormigón empleada en la Fase 2 se detalla en la tabla 13 a modo de ejemplo de la afectación de la humedad en los componentes y se especifica la relación agua/cemento total que queda tras dosificar con estos pesos húmedos. Se observa cómo ésta relación a/c total aumenta a medida que aumentamos el porcentaje de sustitución de árido reciclado, puesto que a medida que añadimos árido reciclado éste absorbe más agua y es necesario añadirla, y la suma de lo que se añade y lo que ya lleva da estas cantidades de agua.

Tabla 13: Dosificación 1 m³ de hormigón H40, Fase 2. Pesos húmedos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c total
HC	380	218,40	807,72	330,096	702,59	0	0,58
HR 20	380	221,28	815,67	247,74	522,92	193,89	0,60
HR 50	380	174,73	878,12	139,22	296,78	432,71	0,648
HR 100	380	189,35	885,08	0	0	692,40	0,652

3.4.3. FASE 3

Tras comprobar que el árido reciclado utilizado en las Fases 1 y 2 (árido *Tipo M*) contiene demasiado betún, se procede a la extracción manual del betún. El contenido de éste era muy superior al límite fijado por la norma, pues casi llegaba al 10% en peso, cuando la norma permite un máximo del 1%. En la tabla 4 se especifican las cantidades fijadas por la norma y en la tabla 5 se recogen los contenidos de cada árido reciclado utilizado.

Se fabrican 3 hormigones de relación agua cemento 0,5 con árido *Tipo B*, los tres hormigones son respectivamente HR20, HR50 y HR100. El HC o hormigón convencional sin sustitución de árido reciclado ya no se fabrica porque es el mismo que en la fase 2, ya que el betún sólo se encuentra en el árido reciclado, no en el natural.

En la Fase 3, el HR20 se fabricó con la misma arena caliza usada en las Fases 1 y 2 de capacidad de absorción del 2,9%. A partir de este momento, por falta de material se utilizó una arena caliza diferente, con una capacidad de absorción de 1,8%.

3.4.3.1. Dosificación Fase 3

En esta fase se sigue el procedimiento de la fase 2 de calcular la humedad de los componentes de la mezcla antes del amasado para volver a dosificar hormigón en volumen teniendo en cuenta ésta humedad. La dosificación para 1 m³ de hormigón de relación a/c 0,5, refiriéndonos a los pesos secos es la detallada en la tabla 14:

Tabla 14: Dosificación 1 m³ de hormigón H40, Fase 3. Pesos secos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva
HR 20 (arena antigua)	380	190	813,14	245,26	521,93	191,79	0,5
HR 50	380	190	821,75	136,44	290,35	426,79	0,5
HR 100	380	190	835,96	0,00	0,00	683,05	0,5

Tras calcular las humedades, y teniendo en cuenta la menor capacidad de absorción de la nueva arena, se dosificó una vez más la mezcla y se obtuvieron los siguientes pesos para 1 m³ de hormigón, tabla 15:

Tabla 15: Dosificación 1 m³ de hormigón H40, Fase 3. Pesos húmedos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva	a/c total
HR 20 (arena antigua)	380	190	813,15	245,26	521,93	191,80	0,5	0,6
HR 50	380	190	821,75	136,44	290,35	426,79	0,54	0,63
HR 100	380	190	835,96	0,00	0,00	683,05	0,53	0,64

La relación a/c efectiva es más alta en HR50 y HR100, puesto que la arena utilizada tenía menor capacidad de absorción y no se conseguía absorber toda el agua añadida. Vemos como la relación a/c total aumenta a medida que se añade más árido reciclado, ya que se debe añadir más agua para contrarrestar la porosidad de éste.

3.4.4. FASE 4

En esta fase se cambió el árido reciclado usado hasta el momento en las fases anteriores. El objetivo de las fases 4 y 5 es demostrar la reducción de la permeabilidad del árido reciclado mediante la carbonatación, por ello se trabajó con áridos no carbonatados en la fase 4 y posteriormente áridos carbonatados en la fase 5.

Se utilizó para la Fase 4 el árido *Tipo F* (tablas 3, 5, 6), no carbonatado, y se hicieron 3 hormigones de relación a/c 0,5 con sustitución del 20, 50 y 100% de árido reciclado respectivamente, siguiendo el proceso de fabricación descrito en el apartado 3.3.

3.4.4.1. Dosificación Fase 4

La dosificación para 1m³ de hormigón de relación a/c 0,5 (pesos secos) se detalla en la tabla 16, y al igual que en las fases anteriores también se decidió calcular la humedad in situ para ser más exactos en la dosificación y obtener la relación a/c específica deseada.

Tabla 16: Dosificación 1 m³ de hormigón H40, Fase 4. Pesos secos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva
HR 25	380	190	813,14	245,26	521,93	191,79	0,5
HR 50	380	190	821,75	136,44	290,35	426,79	0,5
HR 100	380	190	835,96	0,00	0,00	683,05	0,5

Cabe destacar que los áridos Tipo F tenían una humedad muy alta y muy por encima de lo normal en un árido. Tras varias pruebas se determinó que tenían una humedad cercana al 4%. Por ello es interesante dosificar el hormigón de la Fase 4 con los pesos húmedos de los componentes. Tabla 17:

Tabla 17: Dosificación 1 m³ de hormigón H40, Fase 4. Pesos húmedos (kg).

Sustitución de árido	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava	Árido Reciclado	a/c efectiva	a/c total
HR 20	380	214,13	813,71	246,99	525,34	199,58	0,52	0,60
HR 50	380	214,67	822,32	137,29	290,81	444,10	0,52	0,61
HR 100	380	216,99	836,55	0	0	710,77	0,53	0,64

Veamos como una vez más la relación a/c es mayor debido a la nueva arena utilizada.

3.4.5. FASE 5

3.4.5.1. Carbonatación del árido reciclado

No se pudo llevar a cabo la Fase 5 en su totalidad, debido a graves problemas técnicos para conseguir la carbonatación de los áridos *Tipo F*.

La carbonatación acelerada se realizó en cámaras acondicionadas en las que se inyectó CO₂ en una concentración del 100% para asegurar la carbonatación en la totalidad del árido. Al tratarse de especímenes de tamaño pequeño, en teoría no era necesario exponer las muestras de árido al CO₂ durante un periodo muy prolongado de tiempo, pero lastimadamente se ha comprobado que pese a inyectar CO₂ al 100% es necesario mucho más tiempo del esperado para conseguir una carbonatación total del árido, no solamente superficial.

El problema para llevar a cabo la Fase 5 ha sido no poder contar con áridos del *Tipo F* carbonatados, para hacer la comparación con la Fase 4 anterior. La carbonatación idónea se debe realizar en cámaras especializadas, de cierre hermético y con una humedad entre el 40-70% [23] que se debe mantener con una solución salina que no sea dañino para el pH de los poros. Como en el laboratorio de la UPC no se contaba con los aparatos requeridos para la carbonatación se decidió fabricar una cámara acondicionada para poder carbonatar los áridos. En la figura 19 se muestra la cámara fabricada para la operación, se trata de un bidón de polietileno con una válvula inferior y otra superior.



Figura 19: Cámara fabricada para la carbonatación acelerada del árido Tipo F

Dentro del bidón se introducen los áridos y se inyecta CO_2 en una concentración del 100% por la válvula inferior, mientras que el mismo gas desplaza el aire del interior hacia fuera del bidón por la válvula superior. Terminada la operación de inyección de gas se cierran las válvulas que han sido selladas previamente y se deja carbonatar el árido. Pese a los repetidos intentos de sellar el bidón no se consiguió retener el gas suficientemente como para lograr la carbonatación deseada.

Para comprobar la carbonatación del árido se usó fenolftaleína, un indicador colorante. Las muestras carbonatadas no se decoloran si ya están carbonatadas, en cambio si están no-carbonatadas adquieren un color liloso como el que se observa en la figura 20.



Figura 20: Árido carbonatado (izda) y árido no-carbonatado (dcha).

Tras largo tiempo en la cámara de carbonatación fue imposible lograr la carbonatación de los áridos *Tipo F*, con lo que no se pudo llevar a cabo la quinta fase experimental. Pese a todo, se ha investigado profundamente sobre el tema y se cree que en un futuro se debe llevar a cabo la prueba, pues todos los estudios de carbonatación están referidos a hormigones ya fabricados, no se ha tratado todavía de carbonatar los áridos previamente al amasado, y según el estudio realizado en este documento todo apunta a que se conseguiría mejorar las prestaciones del hormigón reciclado. Pese a que se deja abierta la línea de investigación, en este estudio se han valorado los posibles resultados hipotéticos que se habrían obtenido en los hormigones de la Fase 5, como veremos más adelante, basándonos en los estudios ya realizados al respecto.

4. ENSAYOS DEL HORMIGÓN FRESCO Y ENDURECIDO

4.1. Introducción

Los ensayos planificados para este estudio son, para el hormigón fresco, la medida de la consistencia en todas las fases y para el hormigón endurecido:

- *Fase 1:* En hormigón fresco, medición de la consistencia y de la temperatura. Ensayos de compresión, flexotracción, determinación del módulo de elasticidad y permeabilidad para el hormigón endurecido.
- *Fases 2-3-4-5:* En hormigón fresco, medición de la consistencia y de la temperatura. Para hormigón endurecido, ensayos de compresión, flexotracción, determinación del módulo de elasticidad, permeabilidad, Absorción y resistencia a altas temperaturas.

Todos los ensayos se realizarán a los 28, 90, y 180 días, aunque en este documento solamente se incluyen los correspondientes a los 28 días.

4.2. Hormigón fresco

4.2.1. Medida de la consistencia y Temperatura.

Para medir la consistencia del hormigón se realiza el llamado cono de Abrams de acuerdo con la norma UNE-EN 83133-1990. Consiste en llenar un molde de forma troncocónica de 30 cm de altura en tres tongadas de igual cantidad de hormigón cada una compactándolas con una barra de hierro mediante 25 golpes. Una vez se ha llenado todo el molde y realizado las 3 compactaciones, se enrasa al nivel superior y se procede a retirar el molde verticalmente.

La medida de la consistencia se obtiene midiendo el asiento del hormigón que había en el molde con respecto a éste, en centímetros. En función de este descenso, se puede definir la consistencia del hormigón según los valores de la tabla 18:

Tabla 18: *Consistencia del hormigón en función del asiento del cono de Abrams.*

Consistencia	Asiento en cm.
Seca	0-2
Plástica	3 - 5
Blanda	6 - 9
Fluida	10-15
Líquida	16-20

La consistencia de un hormigón refleja directamente la trabajabilidad de éste, propiedad muy importante en obra. Un hormigón con buena trabajabilidad debe tener una consistencia entre blanda y fluida, es decir un descenso entre los 8 y los 15 cm. en la prueba del cono de Abrams.

La medición de la temperatura del hormigón se realiza con un termómetro convencional. Las medidas se toman durante el amasado y al final del amasado.

4.3. Hormigón endurecido

4.3.1. *Propiedades mecánicas*

4.3.1.1. Ensayo de rotura por compresión (UNE 83-304-84).

Para la realización de este ensayo se requerirá una máquina que cumpla las especificaciones que indica la norma. La máquina debe de estar provista de un sistema de regulación de cargas tal que éstas puedan aumentarse de forma continua y sin saltos bruscos. La máquina dispone de dos platos de acero con caras planas y de superficie superior en un mínimo de un 3% a la de la probeta a ensayar. El espesor de los platos debe asegurar la indeformabilidad de los mismos durante el ensayo.

La lectura de las cargas debe realizarse apreciando al menos el 1% del resultado del ensayo.

Debido a que la geometría de las probetas cilíndricas y la colocación de las mismas en la prensa hacen necesario el refrentado con mortero de azufre de la cara rugosa (superficie enrasada en el momento de su fabricación), para asegurar la planeidad entre las dos caras opuestas.

Para las probetas cúbicas, la colocación de las mismas en la prensa será muy sencilla teniendo en cuenta que la cara rugosa (la que se enrasó manualmente

en el momento de su fabricación) quede en un lateral de forma que no esté en contacto con ninguno de los platos de carga. Las probetas cilíndricas deben ser refrentadas en la cara superior tal y como se explica en el *punto 3.3.4.3*.

A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin choques bruscos, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de 5 ± 2 kp/cm²/s (0.5 ± 2 MPa/s). La carga se aplicará sin variación hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. Se tomará como carga de rotura la máxima alcanzada.

En las figuras 21 y 22 se puede ver la prensa utilizada para el ensayo y el ordenador con el que se cuantificaron los resultados, así como también una parte del informe obtenido por el programa (figuras 23 y 24):

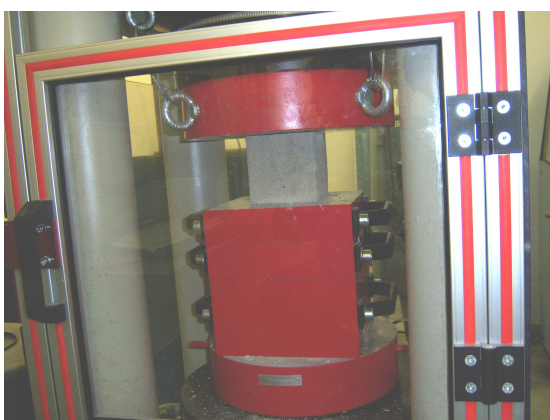


Figura 21: Ensayo de rotura por compresión (a)



Figura 22: Ensayo de rotura por compresión (b)

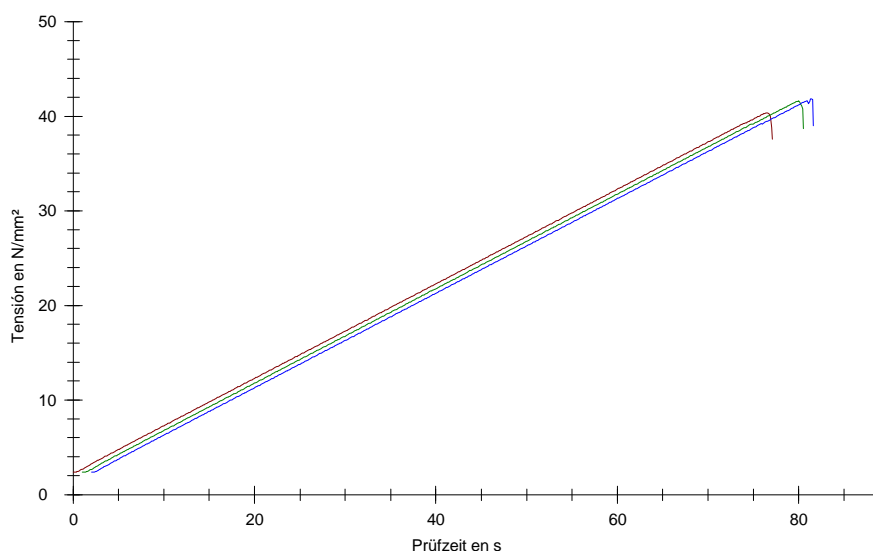


Figura 23: Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (a)

Nr	F_{\max} kN	σ_m N/mm ²	ε_m mm	x1 mm	x2 mm
1	316,82	40,34	0,63	100,00	0,00
2	326,94	41,63	0,73	100,00	0,00
3	328,65	41,85	0,84	100,00	0,00

Figura 24. Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (b)

4.3.1.2. Ensayo de rotura por tracción indirecta – ensayo brasileño (UNE 83- 306-85)

Se utilizará la misma máquina que para la realización del ensayo de rotura por compresión.

La probeta se colocará horizontalmente apoyada en el plato inferior de manera que las superficies planas queden perpendiculares al plato de carga. Con esta colocación se consigue que la carga se aplique únicamente sobre una generatriz. A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin aumentos bruscos de manera que la progresión de la tensión de tracción indirecta sea de $0.3 \pm 0.1 \text{ kp/cm}^2/\text{s}$ ($0.03 \pm 0.01 \text{ MPa/s}$).

Para el cálculo de la tensión de la tracción indirecta se empleará la siguiente expresión:

$$f_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (4)$$

Siendo:

f_{ti} la tensión de tracción indirecta
 P la carga aplicada
 l la longitud de la probeta
 d el diámetro de la probeta

La tensión de rotura a tracción indirecta se redondeará a 1 kp/cm^2 (0.1 MPa).

En las figuras 25 y 26 se puede ver una parte del informe obtenido por el programa:

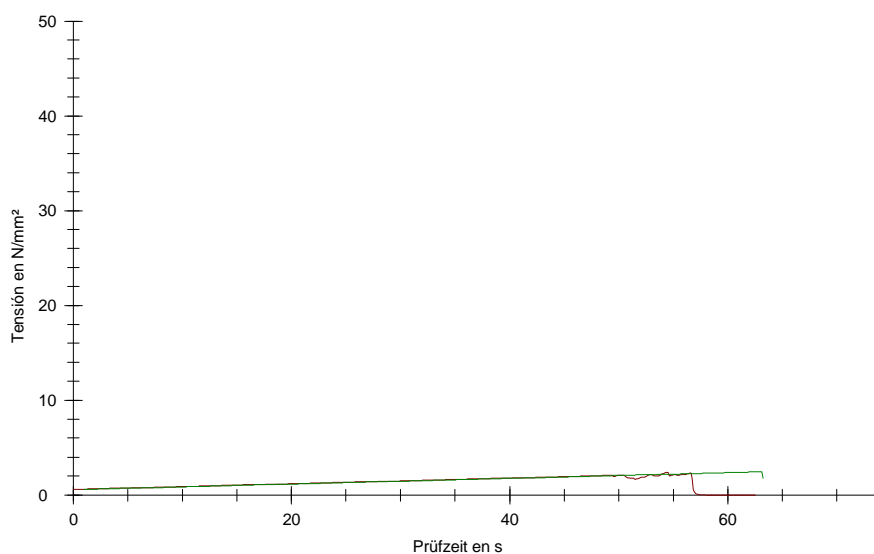


Figura 25: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción (a)

Nr	F_{max} kN	σ_m N/mm ²	ε_m mm	x1 mm	x2 mm
1	75,61	2,41	2,07	100,00	0,00
2	76,38	2,43	0,18	100,00	0,00

Figura 26: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción (b)

4.3.1.3. Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83-316-96)

Se precisa una máquina que cumpla las especificaciones de los ensayos anteriores, capaz de aplicar la carga de ensayo a la velocidad especificada y de mantenerla en el escalón correspondiente. Además, se necesitarán instrumentos para medir los cambios de longitud, teniendo una base de medida no menor de dos tercios del diámetro de la probeta de ensayo y que permita su colocación en tal forma que los puntos de medida sean equidistantes de las bases de la probeta y a una distancia no menor de un cuarto de la altura de la misma.

Previamente a este ensayo deberemos haber obtenido el valor de la resistencia a rotura por compresión siguiendo las especificaciones de la UNE 83-304-84. Se aplicarán 3 ciclos de carga hasta un tercio del valor de la tensión de rotura por compresión obtenida. La tensión se incrementará uniformemente a una velocidad de 0.5 ± 0.2 N/mm²/s hasta ese valor, en el que se mantendrá durante 60 segundos y se registrará la deformación medida, tomando lecturas de cada línea de medida con intervalos de 30s.



Figura 27: Determinación del módulo elástico probeta hormigón.

En las figuras 28 y 29 se puede ver una parte del informe obtenido por el programa:

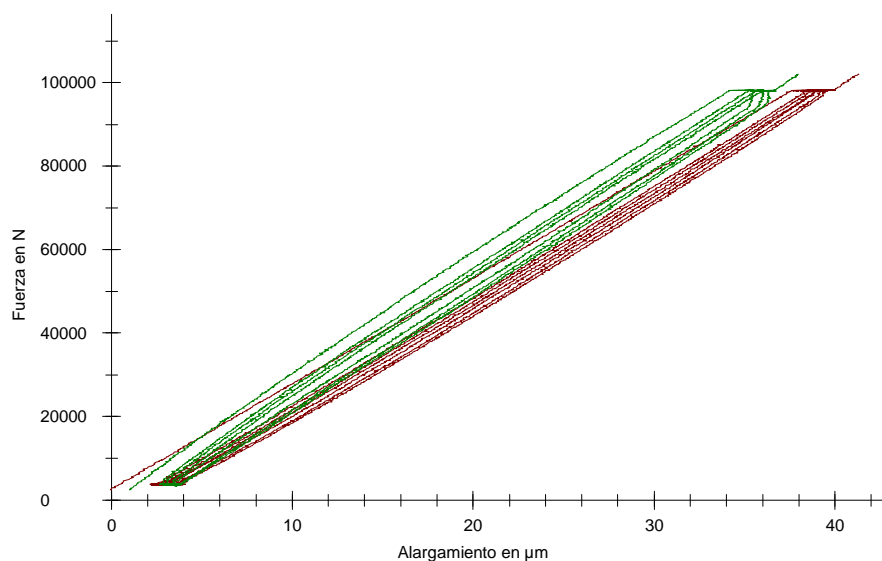


Figura 28: Determinación del módulo elástico (a)

Nr	Diámetro d0 mm	Módulo-E N/mm ²	F _{max} kN
1	100	32986	102,03
2	100	36299	102,03

Figura 29: Determinación del módulo elástico (b)

4.3.2 Ensayos para medir la absorción

En este apartado se describirán los dos ensayos para medir la absorción que se han llevado a cabo.

4.3.2.1. Ensayo de absorción superficial inicial (BS 1881-5:1970)

Este ensayo fue desarrollado inicialmente por Levitt (1969) como un ensayo de control de calidad para unidades de hormigón pretensado. La absorción superficial inicial se define como el flujo de agua que entra a una superficie conocida de hormigón a intervalos determinados de tiempo a una presión y temperatura determinados.

La teoría se basa en la hipótesis de que el hormigón seco absorbe agua por acción capilar a una relación inicialmente alta pero disminuye a medida que el volumen de capilares llenos de agua aumenta. La expresión es la siguiente:

$$ISA = \frac{F}{\Theta} = at^{-n}$$

Donde

ISA	absorción superficial inicial ($m^3/m^2/s$)
t	tiempo de absorción (s)
a, n	parámetros de regresión
Θ	área bajo la tapa (m^2)
F	flujo (m^3/s)

A diferencia del resto de ensayos que se han planteado hasta el momento, para la realización de éste, no disponíamos de los aparatos necesarios en el laboratorio de la universidad, así que se tuvo que preparar manualmente los materiales necesarios.

Se necesita una cubierta que cubra una superficie de hormigón que permita una superficie de contacto entre el agua y el hormigón de 5000 mm². En esta tapa existirán dos tubos fijados. El tubo de entrada conectará una reserva de agua con la superficie del hormigón y el de salida la conectará con un tubo capilar de cristal graduado. Los tubos conectores deben ser flexibles.

El ensayo consiste en llenar todo el circuito de agua de manera que sobre la superficie de hormigón exista una presión de agua constante de 200 ± 20 mm conectado a un tubo graduado que permita ver el volumen de agua que absorbe esa superficie en determinados intervalos de tiempo. Para ello, se debe asegurar que todo el circuito está completamente aislado antes de que el agua empiece a circular mediante un correcto ensamblaje del aparato a la probeta de hormigón a ensayar.

Una vez está todo el aparato bien conectado, se abrirá el circuito abriendo el conducto de la reserva de agua permitiendo el flujo de agua a la superficie del hormigón y subiendo por el conducto de salida hasta el tubo graduado que debe estar colocado a la misma cota que la reserva para que se pueda llenar completamente. A continuación debemos proceder a la toma de medidas del nivel de agua en el tubo graduado en los tiempos de 10, 30, 60 y 120 minutos. El mecanismo montado debe ser tal y como se muestra en la figura 30:

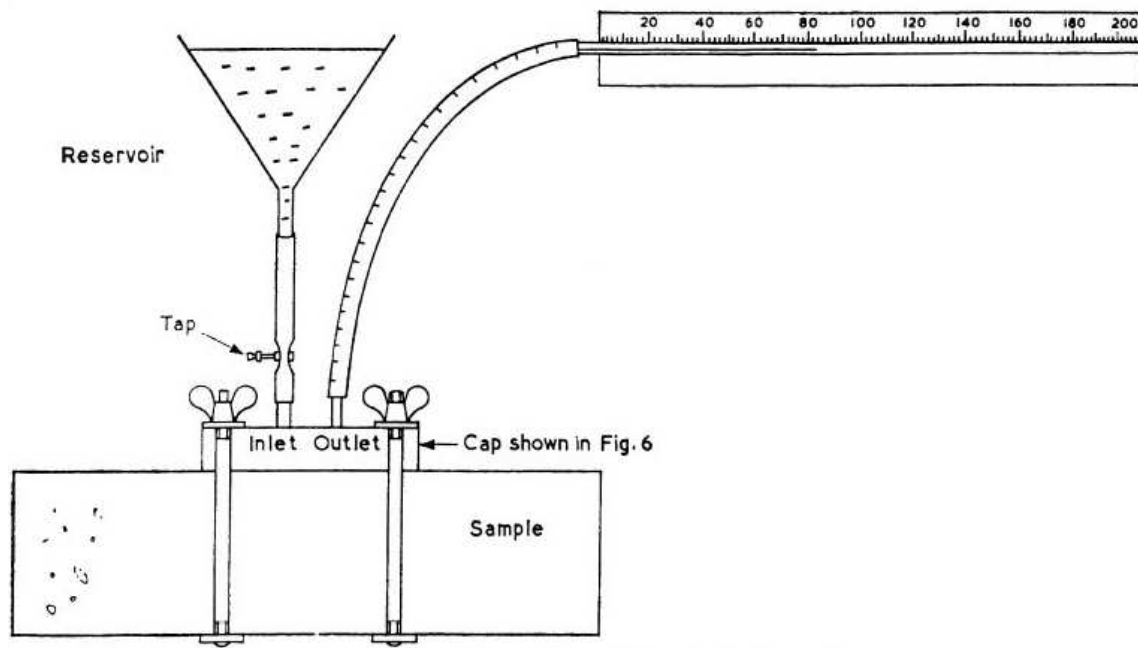


Figura 30: Ensayo de absorción superficial (ISAT) según BS 1881-5

4.3.2.2. Ensayo de sorción

La sorción se define como la relación entre el volumen de agua absorbido por unidad de área entre la raíz cuadrada del tiempo, es decir, una medida de la capacidad de absorción de un hormigón, lo que nos dará una clara idea de su porosidad.

$$\frac{1}{\Theta} \int F dt = S \cdot t^{\frac{1}{2}}$$

Donde

S sorción

La realización de este ensayo es muy sencilla y consiste en sumergir una probeta de hormigón en agua de manera que sólo pueda absorber agua por su parte inferior, para ello se impermeabilizarán la parte inferior de las caras laterales. El nivel del agua debe ser 5mm superior a la superficie de hormigón en contacto con agua, tal y como se puede ver en la figura 31:

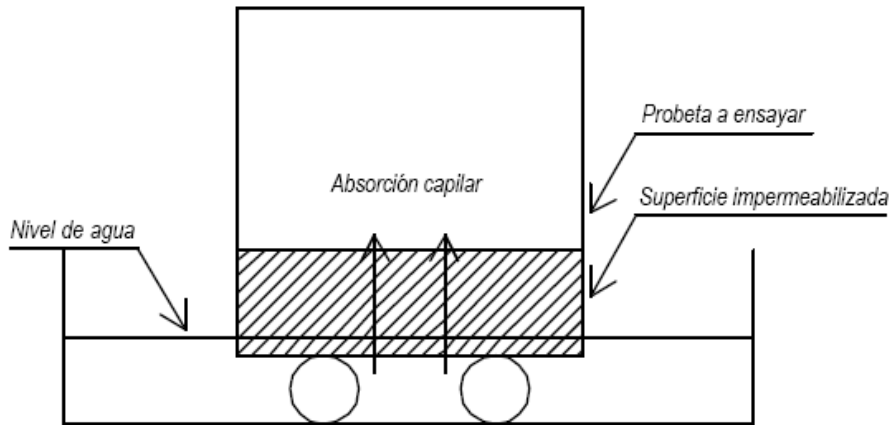


Figura 31: Representación del ensayo de succión.

Del mismo modo que en el ensayo de absorción superficial, se tomarán medidas en los tiempos de 10, 30, 60 y 120 minutos. En este caso se pesará la muestra en estos instantes de manera que el incremento de peso experimentado es directamente el agua absorbida. El proceso se observa en la figura 33.



Figura 32: Impermeabilización de probetas

En ambos ensayos las muestras deben estar completamente secas. Para ello, una vez han sido curadas en la cámara húmeda durante 28 días, se han introducido en un horno a 50°C durante 4 días de manera que el proceso de secado no produzca fisuras que provocarían unos resultados erróneos.



Figura 33: Imagen del ensayo de succión

Se tomó medidas de succión en las Fases 2, 3 y 4 para poder comparar los índices absorción y porosidad con las permeabilidades y propiedades mecánicas obtenidas en cada fase.

4.3.3. Resistencia a altas temperaturas.

El ensayo consiste en exponer las probetas cúbicas fabricadas a una temperatura entre 600-650°C durante 4 horas, y posteriormente, con la probeta a temperatura ambiente, realizar las pruebas mecánicas de tracción y compresión para evaluar en qué grado afectan las altas temperaturas a la resistencia del hormigón reciclado.

Las probetas se introducen en una estufa o mufla como la que se observa en la figura 34:

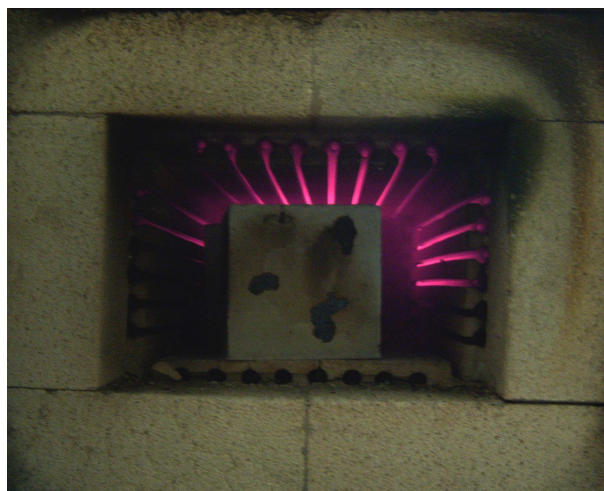


Figura 34: Ensayo de resistencia a altas temperaturas

Para cada hormigón fabricado se ensayaron primero dos muestras sin exposición a altas temperaturas y posteriormente otras dos muestras del mismo hormigón expuestas. El estudio de las propiedades del hormigón expuesto a altas temperaturas se realizó en las Fase 2 y 3, y se comprobará la influencia que tiene el contenido de betún en este ensayo.

4.3.4. Ensayo de Permeabilidad / Penetración.

El ensayo de permeabilidad es el pilar de este estudio, pues a medida que se han ido realizando las diferentes fases del proyecto, se ha intentado progresar y obtener resultados cada vez más positivos en lo que a la permeabilidad se refiere. En el apartado 2 de este mismo estudio, *estado del arte*, se explica la importancia y la influencia de la permeabilidad en el resto de propiedades del hormigón. Por ello, realizar unos ensayos precisos de permeabilidad y analizarlos intensamente ha sido clave en la obtención de conclusiones en este estudio.



Figura 35: Ensayo de Permeabilidad



Figura 36: Ensayo de Permeabilidad

En las figuras 35 y 36 se observa el montaje del ensayo de permeabilidad, las probetas cilíndricas miden 10 cm. de largo por 15 de base, y provienen de las probetas de 30 x 15 fabricadas en cada fase, que son cortadas en 3 partes, de 10 cm de altura cada una. Para el ensayo se impermeabiliza todo el lateral de la probeta cilíndrica de forma que el agua recorra el hormigón en dirección longitudinal.

Según la maquinaria de que se dispone en laboratorio figuras 35 y 36, se pueden ensayar tres probetas cada vez que se monta el ensayo de permeabilidad. El criterio para la toma de probetas ha sido el siguiente: De un mismo hormigón se ensayan dos muestras. La primera muestra será la parte superior de la primera probeta cilíndrica de 30x15 cm. La segunda muestra

será la parte del medio de la segunda probeta, siempre de un mismo tipo de hormigón.

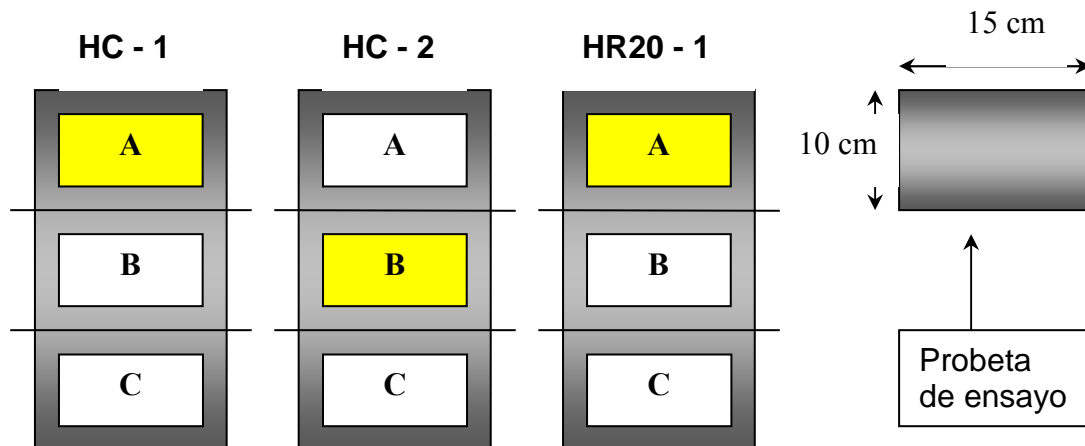


Figura 37: Criterio de toma de muestras para el ensayo de permeabilidad

Como se muestra en la figura 37, el criterio para escoger las probetas de ensayo sería el siguiente: para una misma fase, se ensayan HC-1A, HC-2B, HR20-1A. Tras este ensayo se toman para el siguiente: HR20-2B, HR50-1A, HR50-2B, y así sucesivamente hasta completar las fases.

El ensayo consiste en inyectar agua a presión en una probeta de hormigón y medir la profundidad que alcanza el agua a lo largo de dicha probeta. Cada ensayo dura cuatro días, los dos primeros días la presión del agua sobre la superficie de hormigón es de 1 atm., el tercer día la presión se aumenta a 3 atm. Y el cuarto día hasta 7 atm. El quinto día se abre la probeta por su mitad mediante el ensayo brasileño que se realiza en la prensa que se observa en la figura 38 a continuación y se mide qué profundidad ha alcanzado el agua a lo largo de la probeta durante los cuatro días de duración del ensayo.



Figura 38: Imágenes prensa hormigón para ensayo brasileño.

Una vez abiertas por la mitad las probetas de hormigón tras el ensayo de permeabilidad, se puede ver claramente la profundidad de penetración del agua en dirección longitudinal, la medida de la profundidad se debe realizar inmediatamente después de abrir las probetas, como se observa a continuación, en las figuras 39 y 40:



Figura 39: Imágenes ensayo de permeabilidad (1)



Figura 40: Imágenes ensayo de permeabilidad (2)

Según la Normativa de Española EHE para la fabricación de hormigones, en el apartado 37.3 de durabilidad del hormigón, se cita explícitamente que para que un hormigón tenga validez en el ámbito de la aplicabilidad en obra, la permeabilidad determinada mediante este mismo ensayo no puede superar en ningún punto los 50 mm. de penetración, mientras que la media de penetración del agua en la probeta no debe ser superior a los 30 mm. Más adelante, en el apartado 5.7 analizaremos las permeabilidades obtenidas en los hormigones fabricados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Introducción

En este apartado se detallan y analizan todos los resultados obtenidos en los ensayos descritos en el apartado anterior. Se intentará obtener un modelo de trabajo con el árido reciclado para obtener las óptimas prestaciones de éste, según los resultados obtenidos en cada fase.

5.2. Hormigón fresco

5.2.1. Consistencia

Para conseguir la consistencia y por tanto la trabajabilidad deseada en cada hormigón, en la fabricación de algunos hormigones se añadió cierta cantidad de aditivo fluidificante. Cabe destacar que el aditivo se añade durante el proceso de amasado del hormigón, dependiendo siempre de la consistencia observada durante dicho proceso. Por esta razón a veces es difícil acertar la relación entre cantidad de aditivo a añadir para conseguir una determinada consistencia, como veremos a continuación. En la tabla 19 se detallan las cantidades de aditivo fluidificante añadidas en cada hormigón, en % respecto al peso total de cemento, y las consistencias obtenidas en las mezclas fabricadas datos del asiento en el cono de Abrams, en centímetros, cabe destacar que la cantidad de superplastificante utilizada en todos los casos es inferior a la cantidad recomendada por el fabricante.

Tabla 19: Cantidad (%) de aditivo añadida en cada fase y consistencia obtenida (cm).

ADITIVO/ASIENTO		HC		HR 20		HR 50		HR 100	
		Aditivo (% en peso cemento)	Asiento (cm descenso cono de abrams)	Aditivo (% en peso cemento)	Asiento (cm descenso cono de abrams)	Aditivo (% en peso cemento)	Asiento (cm descenso cono de abrams)	Aditivo (% en peso cemento)	Asiento (cm descenso cono de abrams)
FASE 1	25 MPa	0,41	9,50	0,21	11	0,27	12	0,28	14,50
	40 MPa	0,20	16	0,10	17	0	16	0,20	16,50
FASE 2		0,15	8,50	0,27	16,50	0,07	9,50	0	16
FASE 3		-	-	0	9	0,15	13	0	15
FASE 4		-	-	0,25	10,5	0	13	0	17
FASE 5		-	-	-	-	-	-	-	-

Según la normativa española, un hormigón no puede tener un descenso superior a 15 cm, lo que supondría una consistencia casi líquida, aspecto no deseable ya que puede significar la segregación y exudación del árido dentro del hormigón.

Se puede observar en la tabla de las consistencias que no se mantiene cierta linealidad en la relación *cantidad de aditivo añadido/consistencia*, suponiendo que las dosificaciones respetan siempre la relación a/c.

Como se observa en la figura 41 a continuación, obtenemos mejor consistencia en el hormigón de relación a/c 0,65 (25 Mpa) que en el hormigón de relación a/c 0,5 (40 MPa) donde el asiento supera en todos los hormigones los 15 cm máximos que permite la normativa EHE.

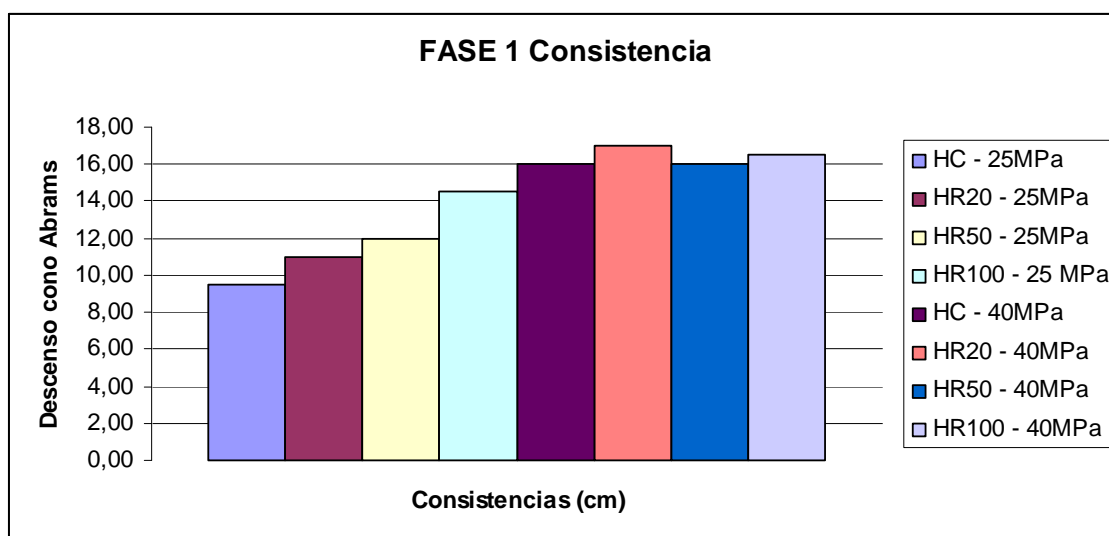


Figura 41: Consistencias Fase 1

Pese a que la cantidad de agua total aumenta a medida que aumentamos la sustitución de árido reciclado, como vemos en las tablas 10 y 11, la cantidad de agua efectiva disminuye a medida que vamos aumentando dicha cantidad de árido reciclado, por una razón muy simple: el árido reciclado es mucho más poroso que el árido natural (apartado 3.3, caracterización de los áridos), y en el momento del amasado, el reciclado absorbe más agua, haciendo que el agua efectiva del conjunto disminuya sustancialmente. Sin embargo en la figura 41 vemos cómo a medida que aumentamos la cantidad de árido reciclado la consistencia es más blanda, cuando debería ser al revés, más seca dado que el árido reciclado absorbe más agua. Esto se debe probablemente a que los áridos no absorben la cantidad esperada de agua y queda un volumen de agua libre inesperado y difícil de medir.

El hecho de que la cantidad de agua efectiva disminuya, puede dar una consistencia más seca, pero es muy difícil en el caso de este estudio determinar la trabajabilidad y consistencia absolutas necesarias, puesto que ambas dependen directamente de la cantidad de aditivo fluidificante, y como se ha dicho este tipo de aditivo se añade arbitrariamente cuando se cree necesario, sin saber de antemano el efecto que va a producir.

Comparando las Fases 1 y 2 entre sí, podemos observar una pequeña diferencia entre las consistencias de la primera y la segunda fase. En la primera fase los áridos se presaturan para que en el proceso de amasado no absorban agua, por ello en la dosificación se incluye menos agua. En cambio en la fase 2 se incluye más agua en la dosificación para que el árido reciclado la absorba durante los primeros minutos de amasado y se sature, para obtener la trabajabilidad deseada del hormigón. Esto conlleva a veces que el árido no sea capaz de absorber por completo el agua incluida de más y la consistencia sea un poco más fluida en la Fase 2 que en la Fase 1.

El hecho es que en el momento de la fabricación, como se detalla en el apartado 3 (*fase experimental*), no es posible secar superficialmente el árido, el único proceso de secado consiste en dejarlo al aire libre durante 10 minutos, y es fácilmente observable a simple vista que todavía queda una cierta cantidad de agua superficial. Por ello, en la realización de la *Fase 1* se introdujo más agua de la necesaria en el amasado del hormigón, según la dosificación proporcionada por Madrid en el marco del proyecto RECHNOR.

El agua libre en el momento de hacer el ensayo de consistencia afectará en gran medida el asiento en la prueba del cono de Abrams. En la fase 1 se decidió tomar medidas del agua absorbida por los áridos tras 10 minutos de presaturación en el proceso de amasado. En la tabla 9 vemos como a medida que aumentamos la sustitución de árido reciclado, el conjunto de agua absorbida + superficial será mayor. En general, el porcentaje de agua superficial se puede estimar más o menos constante en los áridos, simplemente aumenta el porcentaje de agua absorbida en el reciclado. Eso implica que en el momento del amasado habrá menos agua libre y por tanto la relación a/c específica también será menor a medida que se aumente la sustitución de árido reciclado. La disminución no es muy sustancial, pero eso

puede ayudar a determinar el porqué de los resultados obtenidos tanto en los ensayos del hormigón fresco como en los del hormigón endurecido.

Comparando las consistencias de las fases 1, 2 y 3, se ve claramente el efecto del agua superficial y de la absorción de agua del árido reciclado:

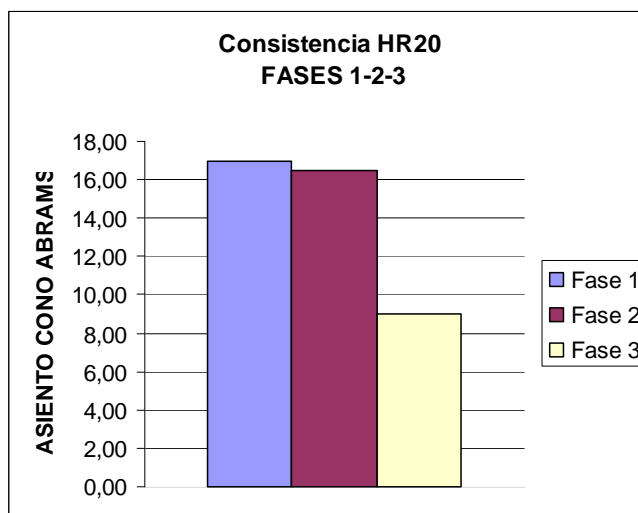


Figura 42: Consistencias Fase 1, 2 y 3 del hormigón HR20

La figura 42 muestra los valores obtenidos en los hormigones HR20 (para el caso de la Fase 1, de $a/c = 0,5$). Dado que el RILEM Technical Committee 121-DRG (1994) recomienda que solamente el 20% del árido natural sea sustituido por árido reciclado en la fabricación de nuevos hormigones de cualquier resistencia, se han tomado estos valores del hormigón HR20 para ejemplificar el resultado.

Vemos cómo en la fase 1, por el efecto del agua superficial de la presaturación, la consistencia es más líquida que en las fases 2 y 3. En la fase 3, se utiliza árido *tipo B*, que es el árido *tipo M* al que se le ha extraído manualmente el contenido de betún. Como el betún no es absorbente, se entiende que en la fase 2 la consistencia sea más fluida que en la fase 3.

5.2.2. Temperatura

La temperatura del hormigón va siempre en aumento a lo largo del proceso de amasado debido a las reacciones químicas que tienen lugar en el hormigón, y es importante realizar un proceso de observación de la temperatura interna de la pasta, ya que altas temperaturas supondrían un mal fraguado del conjunto ocasionando problemas de retracción y consecuentemente fisuración.

Según Ortiz Lozano, J. A. Los resultados experimentales obtenidos indican que cuando menor es el diferencial térmico entre la temperatura del hormigón y la temperatura ambiente, mejores son los resultados relativos a prestaciones mecánicas [21]. En este sentido, la temperatura actúa sobre la velocidad de

absorción y el rozamiento interno de los áridos, mientras que en el hormigón tiene un efecto sobre su desempeño y sobre el coste final.

La temperatura más incidente en la temperatura del hormigón es la de los áridos y luego la del agua. Por lo tanto, preocupándose de la temperatura de uno o de ambos, es posible controlar la temperatura del hormigón recién preparado. Como todos los componentes usados se encontraban a temperatura ambiente en el momento del amasado, no hubo sorpresa alguna en lo que a la temperatura de amasado se refiere. Durante el curado la temperatura se mantuvo constante a 20 °C en la cámara húmeda [21].

A continuación se detallan las temperaturas tomadas durante el amasado, diferenciando cada una de las fases, donde se ve claramente que la temperatura es la ambiente, en aumento con el progreso del amasado. Las temperaturas se tomaron antes de empezar la fabricación (ambiente), durante el amasado (3 minutos después de empezar) y al final del amasado (8 minutos después de empezar).

Tabla 20: Temperatura (°C) tomada en el proceso de amasado

TEMPERATURA		HC			HR 20		
		Ambiente	3 min.	8 min.	Ambiente	3 min.	8 min.
FASE 1	25 MPa	17	19	20	16	18	20
	40 MPa	20	20	21	19	20	21
FASE 2		20	21	21	16	18	19
FASE 3		-	-	-	20	20	22
FASE 4		-	-	-	19	21	21
FASE 5		-	-	-	-	-	-
TEMPERATURA		HR 50			HR 100		
		Ambiente	3 min.	8 min.	Ambiente	3 min.	8 min.
FASE 1	25 MPa	17	19	20	17	19	20
	40 MPa	22	21	21	18	19	20
FASE 2		17	19	20	18	18	19
FASE 3		20	21	22	20	21	22
FASE 4		18	19	21	20	21	21
FASE 5		-	-	-	-	-	-

No se observa dispersión en los valores de la temperatura tomados durante el amasado, incluso cuando la temperatura ambiente es un poco menor (la menor temperatura ambiente es de 16°C, referente al mes de enero y febrero), la temperatura del proceso de amasado se mantiene casi constante en todos los hormigones.

5.3. Hormigón endurecido

En el apartado 1.2 (*metodología de estudio*) se resume la metodología y procedimientos usados en la fabricación de cada fase, para proceder al análisis detallado de las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos realizados a

los hormigones fabricados, explicados en el punto 4 (*ensayos del hormigón fresco y endurecido*)

5.3.1 Ensayo de rotura por compresión (UNE 83-304-84) y Ensayo de rotura por tracción indirecta – ensayo brasileño (UNE 83- 306-85)

Se analizan los resultados obtenidos en las diferentes fases del estudio. Se diferencia el estudio de la Fase 1 por estar enmarcado dentro del Proyecto Rechnor, y seguidamente se comparan los resultados de la Fase 1 con las demás fases.

5.3.1.1. FASE 1. PROYECTO RECHNOR

A continuación se detallan los valores de las resistencias obtenidas en los ensayos de compresión y tracción realizadas en los hormigones de la Fase 1, diferenciando entre el hormigón de relación $a/c = 0,65$ y el de $a/c = 0,5$. Los valores son la media de las resistencias obtenidas tras ensayar tres probetas de un mismo hormigón.

Tabla 21: Resistencia a compresión y a tracción de los hormigones fabricados en la fase 1: Proyecto RECHNOR

FASE 1		COMPRESIÓN (MPa)	TRACCIÓN (MPa)
25 MPa ($a/c=0,65$)	HC	29,07	2,39
	HR20	28,44	2,60
	HR50	28,86	2,71
	HR100	26,42	2,60
40 MPa ($a/c=0,5$)	HC	40,16	3,82
	HR20	33,20	3,54
	HR50	35,12	2,77
	HR100	40,58	2,42

Si nos fijamos en los valores de la resistencia a compresión del hormigón de $a/c=0,65$, vemos claramente que la resistencia disminuye a medida que se aumenta la sustitución de árido reciclado, siendo el hormigón convencional el más resistente de todos ellos. Según estudios ya realizados por otros autores, cuando se trabaja con árido reciclado, utilizar una relación a/c alta implica que la resistencia del hormigón reciclado es igual tanto si se hace con árido reciclado como con árido natural, dado que la nueva ITZ (*interfacial transition zone*) que obtendremos será peor que la que ya se encuentra en los áridos reciclados y no tendrá relevancia sobre la resistencia final de ese hormigón [4]. Los valores de HC, HR20 y HR50 se mantienen suficientemente parecidos, en cambio el valor de la resistencia de HR100 da ligeramente más bajo, debido naturalmente a la alta porosidad del conjunto, pues la presaturación de los áridos sumada a una relación a/c alta conlleva a trabajar con un valor de a/c total muy alto, y esto hace que el volumen de poros sea hasta de dos a tres veces mayor en el HR100 (25 MPa) que en los otros hormigones de 25 MPa.

Por otro lado, ésta presaturación de 10 minutos de los áridos previa al amasado conlleva que cuanto más árido reciclado más absorción de agua habrá por parte del árido, mientras que el árido natural apenas absorbe agua. Según las dosificaciones realizadas para la fabricación del hormigón de $a/c=0,65$, la relación agua/cemento efectiva disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado puesto que éste absorbe cada vez más cantidad de agua, y en cambio la relación agua/cemento total aumenta ya que el árido reciclado ha absorbido mucha agua y se le suma el agua superficial en los áridos. Pese a que la resistencia a compresión de las mezclas disminuye con el aumento de árido reciclado, los valores entran dentro de lo normal dado el volumen de poros de un hormigón HR100, que reduce por sí mismo la resistencia a compresión.

El hormigón de $a/c = 0,5$ (40 Mpa teóricos) no da resultados plenamente satisfactorios, sin embargo es interesante analizar una a una las resistencias obtenidas.

Podemos observar que la resistencia a tracción de los hormigones HR50 y HR100 de $a/c = 0,5$ cada uno es sustancialmente baja comparada con el hormigón convencional y el HR20, debido seguramente al aumento sustancial del volumen de poros de los hormigones reciclados. En cambio la resistencia a compresión del hormigón HR100, fabricado plenamente con árido reciclado, da un valor muy satisfactorio, llegando a ser superior a la resistencia del hormigón convencional de $a/c= 0,5$.

Esto se debe a priori a la presaturación de los áridos. Por un lado, el HC da una resistencia esperada, los áridos se presaturan pero al ser árido natural sin adición de reciclado no absorbe apenas agua, de hecho en el momento del amasado los áridos naturales tendrán más agua superficial que la que habrán absorbido (tabla 4), éste agua superficial se considera influyente en la resistencia final de HC ($a/c=0,5$). En el caso de HR20 y HR50, habrá un cierto valor no medible de agua específica añadida, por un lado agua superficial en los áridos, y por otro lado el agua que han absorbido los áridos reciclados. Por ello los valores de la resistencia dan ligeramente más bajos que en el caso del HC (hormigón convencional). En cambio, en el caso del HR100, todo el árido con que se trabaja es reciclado, tras la presaturación los áridos habrán absorbido gran cantidad de agua y al no haber árido natural no habrá tanta agua superficial como en el caso de HR20 y HR50, la relación a/c efectiva es mucho más baja contando que es todo árido reciclado. Por ello, tras el fraguado y curado a 28 días el hormigón HR100 ($a/c=0,5$) da mejores prestaciones mecánicas que el HR20 y HR50.

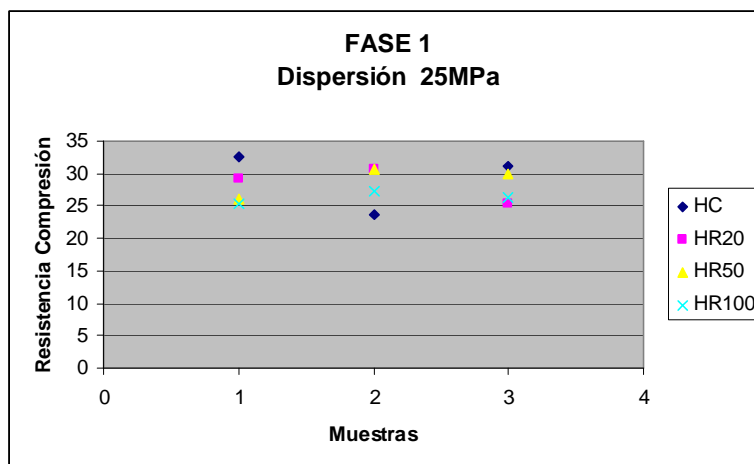


Figura 43: Dispersión ensayo de compresión Fase 1 ($a/c=0,65$)

Los valores que se detallan en la tabla 21 son la media de los valores obtenidos tras ensayar tres probetas de cada hormigón. En las figuras 43 y 44 se muestra la dispersión que presentan los valores de la resistencia a compresión entre muestras de un mismo hormigón. Los resultados obtenidos en las pruebas no presentan gran dispersión entre las muestras ensayadas, de hecho los hormigones reciclados presentan menor dispersión que el hormigón convencional

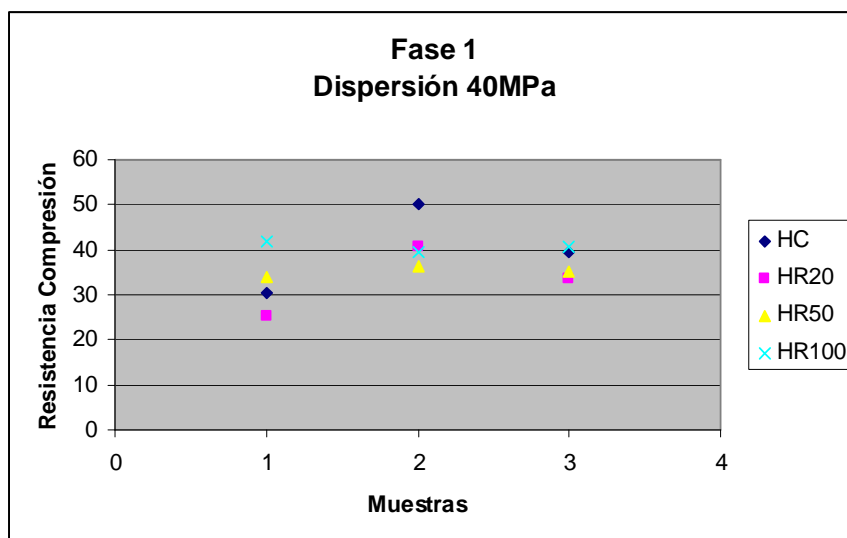


Figura 44: Dispersión ensayo de compresión Fase 1 ($a/c=0,5$)

El hormigón $a/c=0,5$ presenta una mayor dispersión entre las diferentes muestras ensayadas a compresión que las $a/c=0,65$. Las dos muestras que más dispersión presentan són el HC y el HR20 para el hormigón de $a/c=0,65$, y según el valor de la dispersión seguramente será debido al procedimiento constructivo, como una diferente compactación entre muestras del mismo hormigón.

En el ensayo de tracción la dispersión que presentan las muestras es mínima, por ello no se cree conveniente ni necesario hacer referencia a las posibles causas en este documento.

5.3.2. Ensayo de rotura por compresión (UNE 83-304-84) , Ensayo de rotura por tracción indirecta – ensayo brasileño (UNE 83- 306-85) y Determinación del módulo de elasticidad en compresión (UNE 83-316-96)

5.3.2.1. FASES 2 - 3 - 4 - 5

En la tabla 22 se detallan los valores de las resistencias obtenidas en los ensayos de compresión, tracción y determinación del módulo de elasticidad en compresión realizadas en los hormigones de las Fases 2, 3, 4 y 5. Los valores son la media de las resistencias obtenidas tras ensayar tres probetas de un mismo hormigón. Todos los hormigones que se fabricaron en las fases 2, 3, 4 y 5 son de relación a/c=0,5.

Tabla 22: Resistencias a compresión y a tracción de los hormigones fabricados. Determinación del módulo de elasticidad

FASES	% A.R	COMPRESIÓN (MPa)	TRACCIÓN (MPa)	MÓDULO ELÁSTICO (MPa)
FASE 2	HC	41,27	2,46	34642,50
	HR20	39,73	3,93	31040
	HR50	35,93	3,04	29209
	HR100	31,40	2,84	23837
FASE 3(*)	HR20	32,75	2,61	31907
	HR50	15,95 *	1,90 *	19393 *
	HR100	19,43 *	2,18 *	19711 *
FASE 4	HR20	24,01	2,40	25055
	HR50	20,82	2,01	19971
	HR100	22,99	2,05	20521
FASE 5	HR20	-	-	-
	HR50	-	-	-
	HR100	-	-	-

(*). Resultados de resistencia no válidos en HR50 y HR100 de la Fase 3 por haber sido fabricados con arena de diferente calidad.

5.3.2.2. Comparación F1 – F2 – F3. Análisis del proceso de fabricación.

Si nos fijamos en las resistencias a compresión obtenidas en las tres primeras fases, vemos que se aprecian claramente los efectos de la presaturación de la Fase 1 respecto las demás fases. Con la presaturación la relación a/c efectiva disminuye a medida que aumentamos el porcentaje de árido reciclado, y esto provoca que el HR100 – Fase 1 tenga mejores prestaciones que el HR20.

Tabla 23: Resistencias a compresión de las fases 1, 2, 3

% A.R	RESIST. COMPRESIÓN (MPa)		
	FASE 1 (a/c=0,5)	FASE 2 (a/c=0,5)	FASE 3 (a/c=0,5)
HC	40,16	41,27	41,27
HR20	33,20	39,73	32,75
HR50	35,12	35,93	15,95 *
HR100	40,58	31,40	19,43

La resistencia a compresión del HC – Fase 1 está dentro de lo normal y comparándola con el HC - Fase 2 vemos que en el hormigón convencional no se aprecian ni son significativos los efectos de la presaturación del árido natural, dado que el agua total de ambos es similar. En la Fase 2 el comportamiento de los hormigones es el habitual y tantas veces estudiado por otros autores ya que se trata de hormigones reciclados convencionales. Por esta razón se aprecia tan claramente cómo la presaturación beneficia a la resistencia a compresión hormigón en el caso de tener un alto porcentaje de árido reciclado y trabajando con relaciones a/c bajas. En caso contrario, si estamos trabajando con hormigones reciclados de 20% de sustitución la presaturación no es tan beneficiosa para el conjunto, debido a que, aunque se disminuye muy levemente la relación a/c específica, el contenido total de agua sigue siendo elevado. En hormigones intermedios como el HR50, con 50% de árido natural y 50% de árido reciclado, se han obtenido valores muy parecidos en el caso de tratar el árido con presaturación y sin presaturación, pero la tendencia es la de mejorar las prestaciones en el caso de la Fase 1 – presaturación.

Respecto a la resistencia a tracción de los hormigones de las tres fases, cabe remarcar que la evolución de ésta resistencia es dispersa según la Fase de estudio. En la Fase 1 observamos cómo el aumento de árido reciclado es beneficioso para la resistencia a compresión pero en cambio negativo para la resistencia a tracción. En la Fase 2 donde no se han presaturado los áridos previamente, la evolución de la resistencia es la normal y esperada según la evolución de la resistencia a compresión, es decir, a medida que se aumenta el árido reciclado la resistencia a compresión disminuye y la resistencia a tracción se mantiene más o menos estable, probablemente debido a una mejor ITZ. En la figura 45 se aprecia el efecto de la presaturación (Fase 1) en las propiedades mecánicas del hormigón, es decir, para porcentajes de sustitución bajos, la resistencia a compresión es alta y estable hasta el 20% de sustitución. A partir del 20%, la resistencia a compresión va de menos a más con la sustitución de árido. La resistencia a tracción es baja y estable para porcentajes de sustitución entre el 50 – 100%. Entre el 50% y el 20%, la resistencia a tracción aumenta a medida que ponemos menor cantidad de árido reciclado.

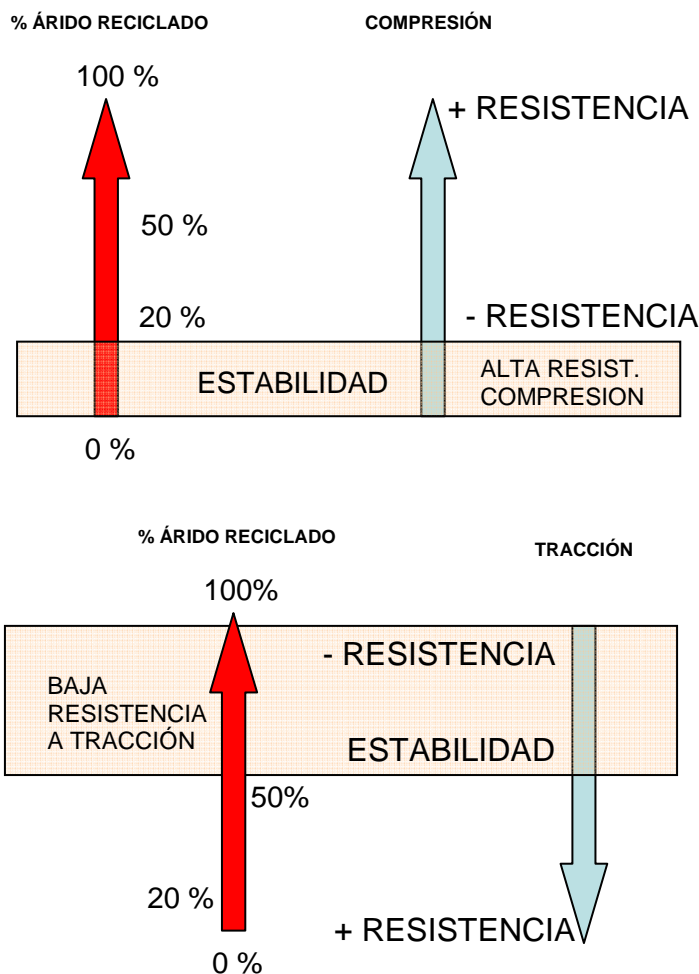


Figura 45: Efectos de la presaturación en las propiedades mecánicas

Los módulos de elasticidad siguen una evolución normal, a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado disminuye el módulo, dado que los áridos reciclados presentan menor rigidez que el árido natural.

En La fase 3 se produjo un error fatal para el estudio de las propiedades mecánicas, pues debido a falta de material en el laboratorio UPC se tuvo que cambiar la arena usada en las fases anteriores y se utilizó una arena con 0% de humedad pero de diferente calidad a la anterior. Por ello, en la Fase 3 no se puede realizar un estudio completo de la afectación del betún en el hormigón reciclado dado que la arena utilizada ha corrompido los ensayos mecánicos.

El procedimiento de fabricación de la Fase 3 es el mismo que en la Fase 2, pero se utilizó árido *Tipo B*, con 0% de contenido bituminoso respecto al 15% de la Fase 2. Los resultados no han sido todo lo satisfactorios que se esperaba a causa de las propiedades de la arena utilizada. El principal problema de la nueva arena utilizada es que tenía menor capacidad de absorción que la utilizada en las fases 1 y 2, y por tanto no absorbía el agua añadida en la dosificación y quedaba bastante más agua libre, lo que llevó a los resultados obtenidos.

Se han podido estudiar mejor las prestaciones de la Fase 3 en otros ensayos como la succión capilar o la permeabilidad, pero en referencia a las propiedades mecánicas se concluye que un alto contenido de betún no es claramente perjudicial para la resistencia a compresión ni para la resistencia a tracción.

5.3.2.3. Comparación Fases 3 y 4 e hipótesis Fase 5.

Como se ha explicado anteriormente, la arena utilizada en las fases 3 y 4 era de diferentes prestaciones y los hormigones no respondieron a las expectativas. Sin embargo, esto nos ofrece la posibilidad de comparar los resultados en ambas fases, pues tanto en la Fase 3 como la Fase 4 se utilizó árido sin betún y la misma arena, y se puede apreciar cómo afectaría la humedad y demás propiedades físicas de los diferentes tipos de áridos entre las fases ejecutadas.

Tabla 24: Resistencias a compresión y a tracción de los hormigones fabricados.

% A.R	RESIST. COMPRESIÓN (MPa)		RESIST. TRACCIÓN (MPa)	
	FASE 3	FASE 4	FASE 3	FASE 4
HR20 (*)	32,75	24,01	2,61	2,40
HR50	15,95 **	20,82	1,90 **	2,01
HR100	19,43	22,99	2,18	2,05

(*).- El HR20 de la Fase 3 se hizo con arena diferente.

**.- Efectos negativos del uso de la arena con menor absorción.

Se puede apreciar claramente cómo afecta la mala calidad de la arena utilizada. El hormigón HR20 de la Fase 3 se fabricó con la antigua arena más absorbente y los resultados, pese a no ser plenamente satisfactorios, entran dentro de la normalidad para un árido reciclado. A partir del HR20 Fase 3 todos los hormigones fabricados se hicieron con la arena de diferente calidad.

En la tabla 24 se detallan las resistencias obtenidas en ambas fases. Se observa que la resistencia a compresión de HR50 y HR100 de la Fase 4 es superior a la Fase 3, y se cree que se debe a la alta humedad de los áridos reciclados *Tipo F* utilizados para la Fase 4, pues se conseguiría un efecto parecido a la presaturación descrita para la Fase 1, que según se ha concluido anteriormente, beneficia al hormigón con altos porcentajes de árido reciclado. Pese a no haber llegado a ejecutar la Fase 5, se pueden hacer referencias hipotéticas a los resultados que se obtendrían tras la carbonatación de los áridos reciclados. Dado que la carbonatación densificaría el árido y reduciría considerablemente el volumen de poros inicial del árido reciclado, y con ello disminuiría el volumen de poros del hormigón fabricado, las resistencias serían considerablemente superiores a las obtenidas en la fase 4 anterior[17]. La resistencia a tracción notaría un mayor incremento debido a la reducción de la porosidad del conjunto, y la resistencia a compresión aportaría valores similares o ligeramente peores que los del hormigón convencional. Por ello es necesario que quede abierta la línea de investigación, desde este documento se seguirá el estudio y la evolución del caso para llegar a conclusiones empíricas al respecto.

5.3.3. Ensayos para medir la absorción.

5.3.3.1. Ensayo de absorción superficial inicial

Después de múltiples intentos de realización de este ensayo, no se ha podido llevar a cabo con éxito. A pesar de seguir el protocolo marcado por la norma, no se ha podido conseguir que el agua pueda circular tal y como se explica en el ensayo.

A pesar de esto se proponen algunas modificaciones para poder calibrar el ensayo de manera adecuada y poder realizar la correspondiente toma de medidas.

Primeramente se debería haber conseguido una cubierta de metacrilato más gruesa, ya que la que se había conseguido, se rompió en uno de los intentos por forzar la rosca de sujeción. También se debería mejorar cada una de las uniones de los tubos con las otras piezas, porque se pudo observar algunas pérdidas que tuvieron que ser solucionadas con silicona. Además, la unión entre el tubo de plástico y el graduado de cristal no era perfecta y se tuvo que recubrir con parafilm para evitar posibles fugas. Se debería conseguir un tubo graduado con un buen tapón final o bien con un buen desagüe que se pudiera cerrar correctamente, porque el existente no encajaba perfectamente y por mucho empeño que se pusiera en realizar un buen tapón, no se llegó a conseguir un aislamiento perfecto. Otro aspecto a mejorar serían las pinzas colocadas en los tubos que permitían parar la circulación en los tubos ya que no ejercían su función correctamente dificultando el control del circuito. Se propone también el cierre de la tapa superior con tuercas de mariposa en vez de tuercas normales, para poder realizar el ajuste manualmente evitando el uso de llaves que no reflejan la fuerza real que se le está aplicando a la tapa.

Si se pudiera mejorar todos estos aspectos, resultaría mucho más sencilla la calibración del ensayo. Una alternativa, hubiera sido realizar el ensayo con un aparato ya calibrado previamente, pero no se pudo conseguir ninguno.

5.3.3.2. Ensayo de succión

Este ensayo resultó ser mucho más sencillo que el anterior puesto que no requería de ningún dispositivo especial. Se tomaron medidas de succión de las fases 2, 3 y 4.

En la figura 46 vemos los resultados de la succión capilar en la Fase 2, fabricada con árido *Tipo M* y sin presaturación.

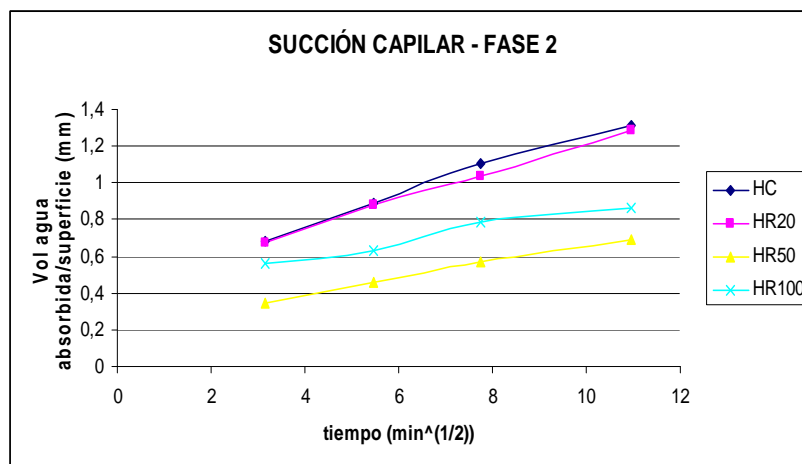


Figura 46: Succión Fase2

La succión se define como la pendiente de cada una de las rectas de regresión de los diferentes ensayos, obteniendo así los resultados de la tabla 25:

Tabla 25: Succión Fase 2 (mm/min^{0,5}).

FASE 2	
HORMIGÓN	SUCCIÓN (mm/min ^{0,5})
HC	0,082619904
HR20	0,07898434
HR50	0,04446771
HR100	0,04064454

El HR50 es el hormigón que menos volumen de agua absorbe (figura 46), pero se aprecia que el hormigón HR100 es el que menos capacidad de absorción tiene, y la tendencia general en los hormigones de esta Fase 2 es la de disminuir la succión con el aumento de árido reciclado. Es un resultado que no deja de sorprender puesto que lo habitual sería el resultado contrario, es decir, que la succión aumentara a medida que se aumenta el árido reciclado en un hormigón debido a su porosidad.

En la figura 47 podemos ver la succión de la Fase 3, donde se utilizó árido *Tipo B* y sin presaturación.

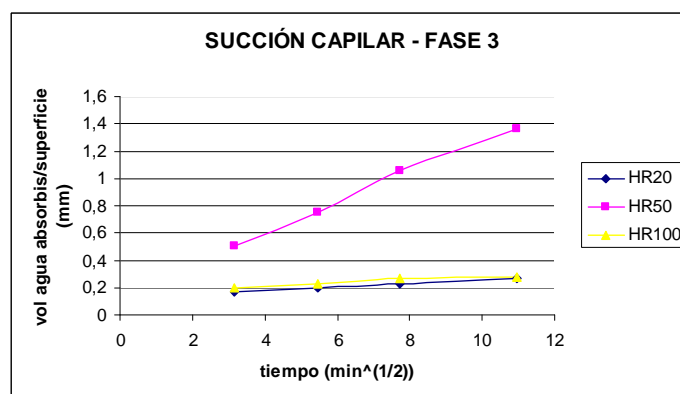


Figura 47: Succión Fase 3.

Observando el gráfico se ve claramente que el hormigón HR50 es el que más capacidad de absorción presenta en relación al HR20 y el HR100. Esta dispersión tan grande de resultados y la falta de linealidad nos impide hacer un análisis correcto de la succión de la Fase 3 en si, de forma que es necesario compararla con los resultados de la Fase 2 para poder extraer conclusiones fiables.

Tabla 26: Succión Fases 2 y 3 (mm/min^{0,5}).

HORMIGÓN	SUCCIÓN (mm/min ^{0,5})	
	FASE 3	FASE 2
HC	-	0,082619904
HR20	0,012163172	0,07898434
HR50	0,11199189	0,04446771
HR100	0,01102047	0,04064454

Exceptuando el HR50 – Fase 3 los valores de succión obtenidos son bastante menores en ésta Fase 3 que en la Fase 2. El hormigón HR50 – Fase 3 lo declaramos defectuoso como se aprecia en el apartado 5.3.2.3 De esta forma, se puede decir que la extracción de betún para obtener el árido *Tipo B* ha propiciado obtener una baja succión respecto a la Fase 2 fabricada con árido *Tipo M*, se cree que el betún aporta más zonas de debilidad al hormigón y al extraerlo se consigue densificar el conjunto, de forma que la succión capilar se reduce notablemente.

La Fase 4 da resultados más coherentes pues el HR100 presenta más capacidad de absorción capilar que el HR20 y HR50, algo natural ya que el árido *Tipo F* no fue tratado para fabricar la Fase 4 y se trata por tanto, de árido reciclado normal. El hormigón HR100 es el que más volumen de agua absorbe y más succión presenta como se aprecia en la figura 48.

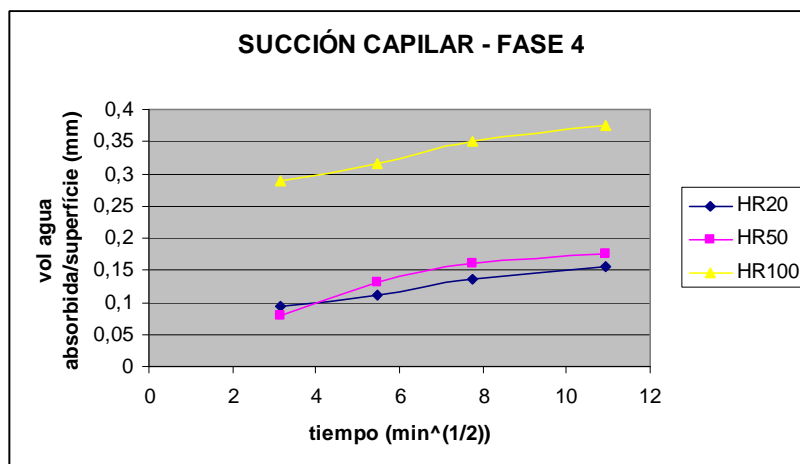


Figura 48: Succión Fase 4.

Podemos realizar las hipótesis de los resultados de succión que habríamos obtenido en la Fase 5, y serían evidentemente más bajos que en la fase anterior, debido a la densificación del conjunto. En la tabla 27 se presentan los resultados de succión, los valores del volumen de agua absorbida serían también inferiores a los obtenidos en la Fase 4.

Tabla 27: Succión Fases 4 e hipótesis Fase 5.

HORMIGÓN	SUCCIÓN (mm/min ^{0,5})	
	FASE 4	FASE 5 (hipótesis)
HR20	0,02	≅ 0,01
HR50	0,03166667	≅ 0,015
HR100	0,02833333	≅ 0,017

De las pruebas realizadas en el ensayo de succión se puede concluir que, en hormigones con alto porcentaje de betún, Fase 2, aumentar la sustitución de árido reciclado (aumentamos también el contenido bituminoso) implica una disminución sustancial de la succión, mientras que extrayendo todo el contenido de betún la succión sigue una progresión lógica, es decir, a medida que se aumenta la sustitución de árido el hormigón tiene más capacidad de absorción (Fase 3 y Fase 4) y se hace más vulnerable al ataque de agentes agresivos por difusión.

Es necesario destacar que todos los ensayos se realizan sobre dos muestras de un mismo hormigón, y las que presentan más dispersión son aquellas que tienen bajos porcentajes de sustitución de árido reciclado, es decir, el HR20 presenta más dispersión de resultados que el HR100.

5.3.4. Resistencia a altas temperaturas de las Fases 2 y 3: Diferencias en el contenido bituminoso.

En los estudios sobre la resistencia del hormigón expuesto a altas temperaturas se expone la probeta de hormigón a temperaturas que aumentan

de forma gradual, y es conocido que los efectos más significativos de las altas temperaturas sobre el hormigón se producen a partir de los 600°C (Y. N. Ghan, et al.) [14], [15].

Para cada hormigón fabricado se ensayaron primero dos muestras sin exposición a altas temperaturas y posteriormente otras dos muestras del mismo hormigón expuestas. El estudio de las propiedades del hormigón expuesto a altas temperaturas se realizó en las Fase 2 y 3., y se comprobará la influencia que tiene el contenido de betún en este ensayo.

Tras exponer las muestras de hormigón a 650°C durante 4 horas, se obtuvieron resultados bastante dispersos. Una probeta simplemente estalló y no se pudo determinar su resistencia. En la tabla 28 observamos los resultados de resistencia a compresión obtenidos antes y después de la exposición a altas temperaturas.

Tabla 28: efectos de la alta temperatura en la resistencia a compresión, fase 2 y 3.

	RESISTENCIA COMPRESIÓN (MPa)					
	FASE 2			FASE 3		
	No Burned	Burned	%Resist. residual	No Burned	Burned	%Resist. residual
HC	67,38	38,07	56,5%	-	-	-
HR20	54,69	33,32	61,9%	53,83	X	X
HR50	46,38	29,99	64,6%	29,93	23,29	78%
HR100	46,11	22,77	49,38%	31,29	X	X

Bajo altas temperaturas, el hormigón experimenta cambios en la estructura de los poros, el efecto es conocido como “*microstructure coarsening effect*”. Éste efecto es una de las razones de la pérdida de resistencia a compresión a temperaturas superiores a 600°C. Éste efecto también reduce considerablemente la durabilidad del hormigón en términos de permeabilidad. Cabe destacar que las muestras de un mismo hormigón no han presentado gran dispersión en los resultados, tanto las expuestas al fuego como las no-expuestas presentan resistencias muy similares dentro de un mismo tipo de hormigón. Algunas probetas estallaron en la mufla antes de pasar las cuatro horas de ensayo, éste fenómeno no está aun definido, pero se cree que se debe a algunas propiedades del hormigón en el momento del ensayo, como por ejemplo las propiedades de los componentes o la humedad de la muestra [22].

En la tabla vemos como a medida que aumentamos el contenido de árido reciclado la resistencia disminuye sustancialmente, pero si observamos el gráfico de la figura 49 de la Fase 2 se aprecia que el porcentaje de disminución de la resistencia entre probetas expuestas y no-expuestas es muy similar entre hormigones de una misma fase.

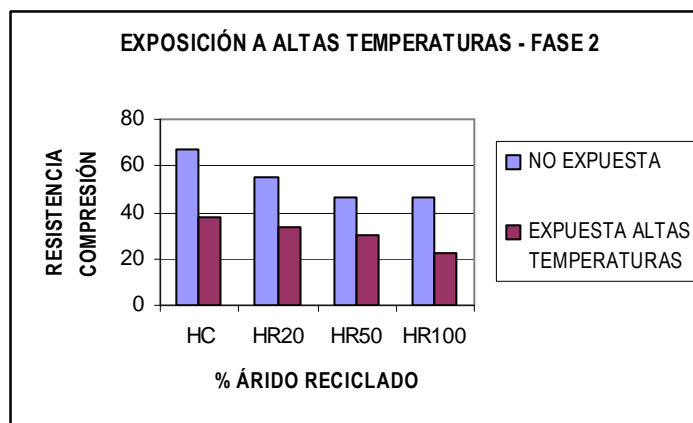


Figura 49: Porcentaje de aportación a la resistencia de las muestras expuestas y no-expuestas

Se concluye que el contenido de betún no afecta a la disminución de la resistencia provocada por la exposición a altas temperaturas, como se refleja en la tabla 28.

5.3.5. Ensayo de Permeabilidad / Penetración.

Los resultados del ensayo de penetración han sido una de las partes más importantes de esta tesina, y la clave para la determinación de los objetivos impuestos en este estudio. La permeabilidad influye en gran parte de las propiedades del hormigón, y los ensayos realizados en este caso han sido de gran ayuda para el análisis y las conclusiones finales del estudio. La metodología a seguir en el tratamiento de los áridos reciclados queda un poco más clara tras el análisis de los ensayos de permeabilidad. A continuación se detallaran los resultados obtenidos en los ensayos y se analizarán en busca de la aplicabilidad ideal de los áridos reciclados en el hormigón. También se analizará su relación con las prestaciones mecánicas de cada hormigón para ver cómo puede llegar a influir la permeabilidad en las propiedades finales de un hormigón reciclado.

Dado que el hormigón reciclado es altamente poroso, todavía no hay fiabilidad en el mundo de la construcción para su utilización directa en obra. Por ello se han tratado los áridos de diferentes maneras con el fin de conseguir mejorar sus propiedades.

De cada probeta ensayada a penetración, se parte por la mitad mediante el ensayo brasileño y se toman las medidas de la profundidad del agua de varios puntos de cada una de las partes, según la normativa española instrucción de hormigón EHE, capítulo 37.3 “*Durabilidad del hormigón*”. Para facilitar y agilizar el análisis se han tomado las medias de los valores de ambas mitades y se han unido en un mismo gráfico, como se muestra en la figura 50:

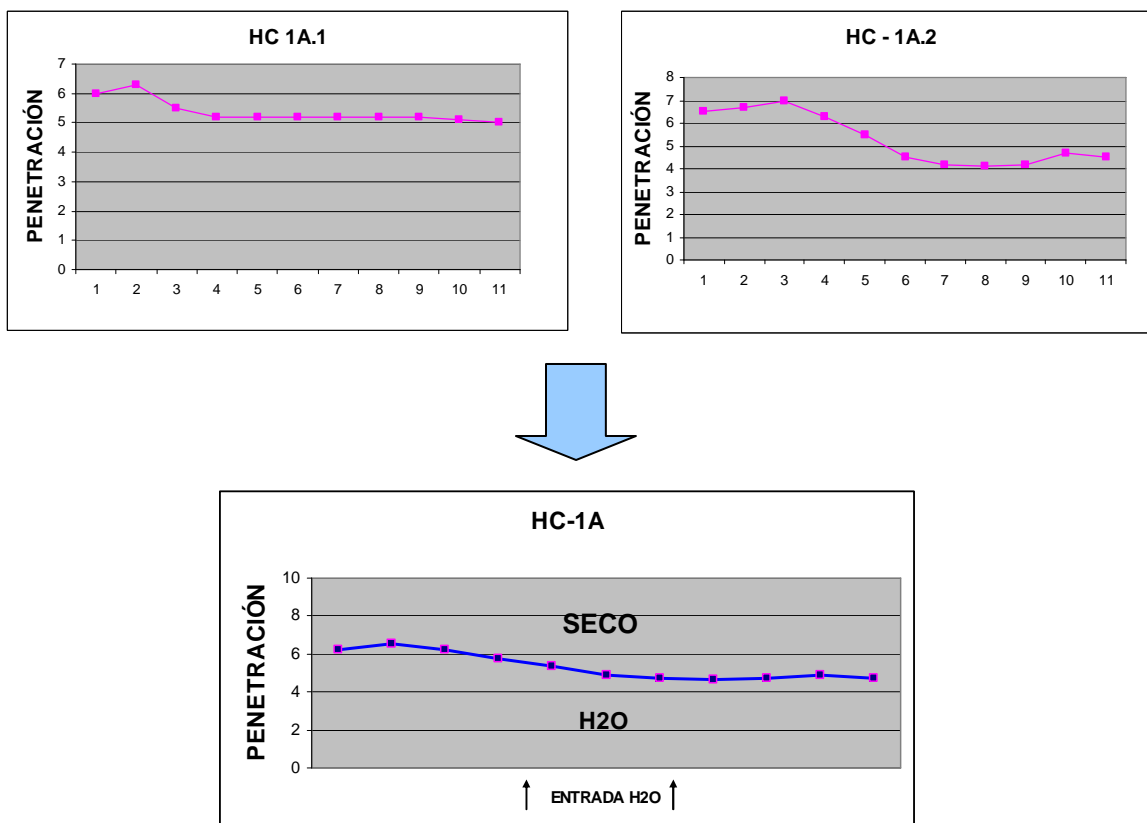


Figura 50: Gráfico de penetración de una muestra ensayada

A continuación se presentan los valores obtenidos en cada ensayo, y los gráficos y fotografías más significativos de permeabilidades.

5.3.5.1. FASE 1. PROYECTO RECHNOR.

a/c = 0,65; Caso HC

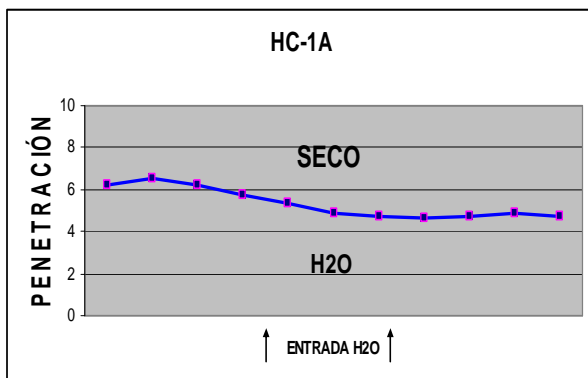


Figura 51: Permeabilidad HC – 1A

Según la instrucción EHE, capítulo 37.3 “*Durabilidad del hormigón*”, en el apartado 3.2 se especifica que un hormigón es aplicable en obra si en

Tabla 29: Permeabilidad HC – 1A

BASE	PENETRACIÓN cm
0	6,25
1	6,5
2	6,25
3	5,75
4	5,35
5	4,85
6	4,7
7	4,65
8	4,7
9	4,9
10	4,75
MEDIA	5,33

el ensayo de permeabilidad ningún punto supera los 50 mm de profundidad de agua, o la media de ellos es inferior a 30 mm. Tanto en la primera muestra de hormigón convencional HC de la primera fase como en la segunda muestra HC analizada, no se cumplen estos valores. La segunda muestra ensayada de hormigón convencional es HC – 2B, y en este caso el agua alcanza mayor profundidad de penetración, con una media de 7,24 cm de profundidad del agua.

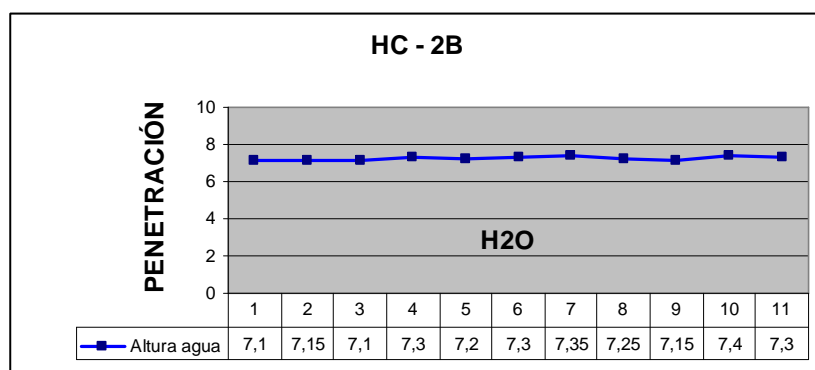


Figura 52: Permeabilidad HC – 2B

Este fenómeno de diferenciación entre muestras diferentes de un mismo hormigón puede ser debido a que en las muestras “B”, al tratarse de la parte media de una probeta de 30 x 15cm (apartado 4.3.4, figura 37), nos encontramos con muchas más ITZ o zonas de debilidad, y es posible que en la mayoría de casos el agua penetre con más facilidad en una muestra B que una muestra A, donde la base de penetración es la enrasada en el momento del

enmoldado. En la figura se aprecia la diferencia entre la superficie de una muestra A y una muestra B.

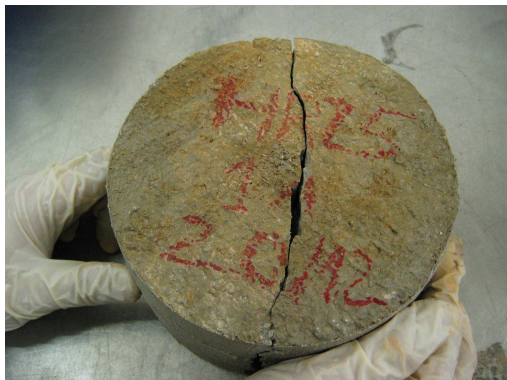


Figura 53: Probeta 1A; base enrasada



Figura 54: Probeta 2B; base con más ITZ.

A simple vista se puede apreciar que la muestra 2B cuenta con más zonas de debilidad que la muestra 1A, y es lícito pensar que el agua puede penetrar con más facilidad por las zonas de debilidad que por una superficie enrasada, donde habrá más concentración cementicia.

Como podremos comprobar a continuación, este fenómeno se ratifica en la mayoría de muestras analizadas, con lo cual se cree que es un factor a tener muy en cuenta en el momento de trabajar con áridos reciclados, aunque sea evidente que en la aplicabilidad de un hormigón ya se cuenta con que la cara de exposición casi nunca contará con tantas ITZ's como en el caso de estos ensayos.

La tabla 30 es un cuadro resumen de las permeabilidades obtenidas para los hormigones de la Fase 1, fabricados con el método de la presaturación de áridos, de relación $a/c=0,65$ y $a/c=0,5$ respectivamente. Los valores que se presentan son la media de la penetración del agua en distintos puntos reglados de la base de una probeta. En general los valores entre sí no presentan dispersión, pero existen casos aislados de penetraciones no lineales que se deben en su mayoría a entradas de agua laterales por una mala impermeabilización.

Tabla 30: Permeabilidades Fase 1

	PENETRACIÓN H ₂ O (cm)	
	25 MPa	40 MPa
HC – 1A	5,33	2,61
HC – 2B	7,24	3,35
HR20 – 1A	2,62	2,1
HR20 – 2B	8,0	4,38
HR50 – 1A	8,3	1,65
HR50 – 2B	10	3,26
HR100 – 1A	10	2,86
HR100 – 2B	10	2,88

Como se ha comentado anteriormente, un hormigón no es admisible si supera de media los 30 mm de penetración. En los hormigones de $a/c=0,65$ solamente el HR20 – 1A cumple este punto de la normativa EHE de hormigones, aunque en el mismo apartado se especifica también que ningún punto puede superar los 50 mm de profundidad, y si observamos el gráfico de la figura 55 extraído de las profundidades de agua alcanzadas en el HR20 – 1A vemos que algunos puntos de la probeta superan los 50 mm reglados, lo que se debe a alguna grieta en la muestra.

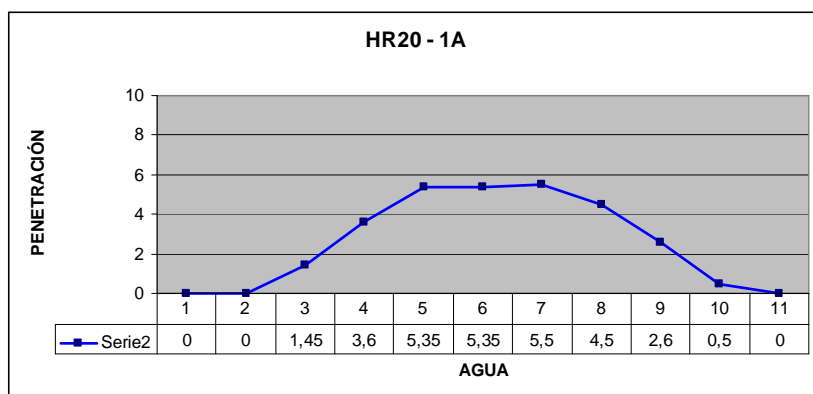


Figura 55: Permeabilidad HR20 – 1ª

En cambio la muestra HR20 – 2B da una permeabilidad altísima y no deseable. Se comprueba la teoría explicada anteriormente de la diferenciación de resultados según la zona de la probeta expuesta a ensayo.

Todas las demás probetas de relación $a/c=0,65$ superan con creces los 30 mm de media y los 50 mm en todos los puntos de la probeta de ensayo. Es evidente que la presaturación de los áridos combinada con una relación a/c alta (0,65) dan unos resultados pésimos en lo que a permeabilidad se refiere, incluso el hormigón convencional HC sufre los efectos de la presaturación traducidos en un aumento del agua libre en el hormigón que eleva la permeabilidad de éste. Los HR50 y HR100 de $a/c=0,65$ fabricados mediante el método de la presaturación no son deseables por la altísima permeabilidad que presentan, pues el agua llega a traspasar toda la probeta antes incluso de finalizar el ensayo.

No deja de llamar la atención que el hormigón convencional de $a/c=0,65$ de esta Fase 1 de unos resultados tan malos de permeabilidad, pues su resistencia a compresión entra dentro de lo normal, e incluso es la más alta de todos los hormigones de $a/c=0,65$. Este fenómeno puede ser debido a la dispersión entre los resultados de la resistencia a compresión, pues los HC y HR20 eran los que mayor dispersión presentan, lo que explicaría que una muestra de HR20 tenga poca permeabilidad comparada con otra muestra del mismo HR20

En las figuras 56 a 59 podemos ver diferentes muestras; la de HR20 – 1A, la HR20 – 2B de alta permeabilidad y las muestras de HR50 y HR100 donde el

agua casi llega a 10 cm y supera los 10 cm de altura de la probeta respectivamente.



Figura 56: Permeabilidad HR20 – 1A



Figura 57: Permeabilidad HR20 – 2B



Figura 58: Permeabilidad HR50 – 1A



Figura 59: Permeabilidad HR100

Se ve claramente que el agua (zona oscura de la muestra) casi traspasa toda la probeta en el HR50 y llega a traspasar en el HR100, todos de $a/c=0,65$.

Para los hormigones de relación $a/c=0,5$, siempre en la Fase 1, las permeabilidades son bastante mejores, y en gran parte cumplen satisfactoriamente la normativa. Los únicos hormigones no admisibles por normativa son HC – 2B, HR20 – 2B y HR50 – 2B por superar los 30 mm de media de profundidad de agua, aunque tanto el HC como el HR50 se darían por válidos por ajustarse mucho a esta norma. Se comprueba una vez más la teoría de las ITZ.

Es necesario remarcar que los hormigones con más sustitución de árido reciclado, es decir HR50 y HR100 presentan mejores propiedades respecto al hormigón convencional y el HR20 cuando hay presaturación de los áridos y la relación agua/cemento es baja, además de presentar más linealidad en los resultados de los ensayos. En las figuras 60 y 61 se muestra el gráfico de las permeabilidades de HR20 – 1B y HR100 – 1A, donde se ve la diferencia entre las profundidades de agua en cada caso.

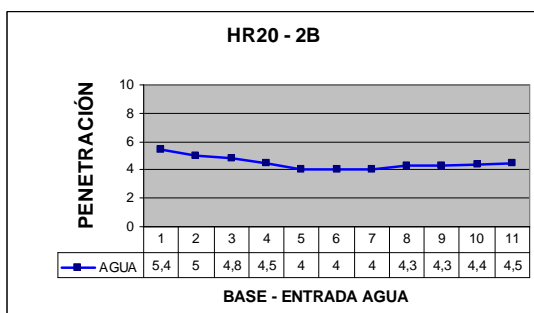


Figura 60: Permeabilidad HR20 – 2B

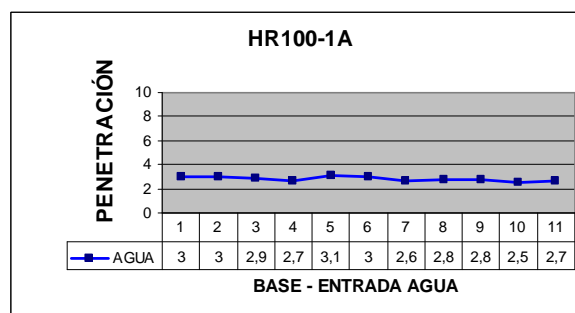


Figura 61: Permeabilidad HR100 – 1A

5.3.5.2. Permeabilidad F2 y comparación con F1

Para poder estudiar los efectos de la presaturación de áridos en el hormigón y concretamente en la permeabilidad debemos comparar las fases 1 y 2, pues se han utilizado los mismos componentes para la fabricación de los hormigones, simplemente se ha cambiado la metodología de trabajo, en este caso, la presaturación. En la tabla 31 podemos ver la media de los resultados obtenidos en ambas fases, haciendo referencia a los hormigones de $a/c=0,5$, pues a partir de la Fase 2 solamente se trabajó con ésta resistencia característica, referida a una relación agua/cemento de 0,5.

Tabla 31: Permeabilidades Fase 1 y Fase

	PENETRACIÓN H ₂ O (cm)	
	FASE 1 (40 MPa)	FASE 2
HC – 1A	2,61	0,57
HC – 2B	3,35	3,55
HR20 – 1A	2,1	3,7
HR20 – 2B	4,38	5,52
HR50 – 1A	1,65	8,83
HR50 – 2B	3,26	4,78
HR100 – 1A	2,86	2,71
HR100 – 2B	2,88	5

Se ve claramente que los hormigones de la fase 2, exceptuando el HC – 1A, son mucho más permeables que los de la fase 1 (presaturados). Esto lleva a conclusiones muy importantes todavía poco estudiadas en el campo de los hormigones reciclados, pues la presaturación de los áridos previa al amasado de hormigón, en contra de las expectativas iniciales, conduce a una mejora muy sustancial de la permeabilidad del hormigón. Los efectos positivos de la presaturación se hacen más evidentes a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución de áridos, pues al ser tan porosos absorben más agua cuando se presaturan, disminuye la relación a/c efectiva, y esta acción produce los efectos que acabamos de ver, menos agua en el momento de la fabricación gracias a la presaturación nos lleva a obtener hormigones menos permeables a 28 días, y es de suponer que estas propiedades mejoraran con el tiempo de curado y la edad del hormigón.

En la figura vemos la comparación entre fase 1 y fase 2 y con ello la mejora del hormigón con la presaturación (Fase 1), con los gráficos de HR50 – 1A, HR50 – 2B y HR100 – 2B de cada fase respectivamente.

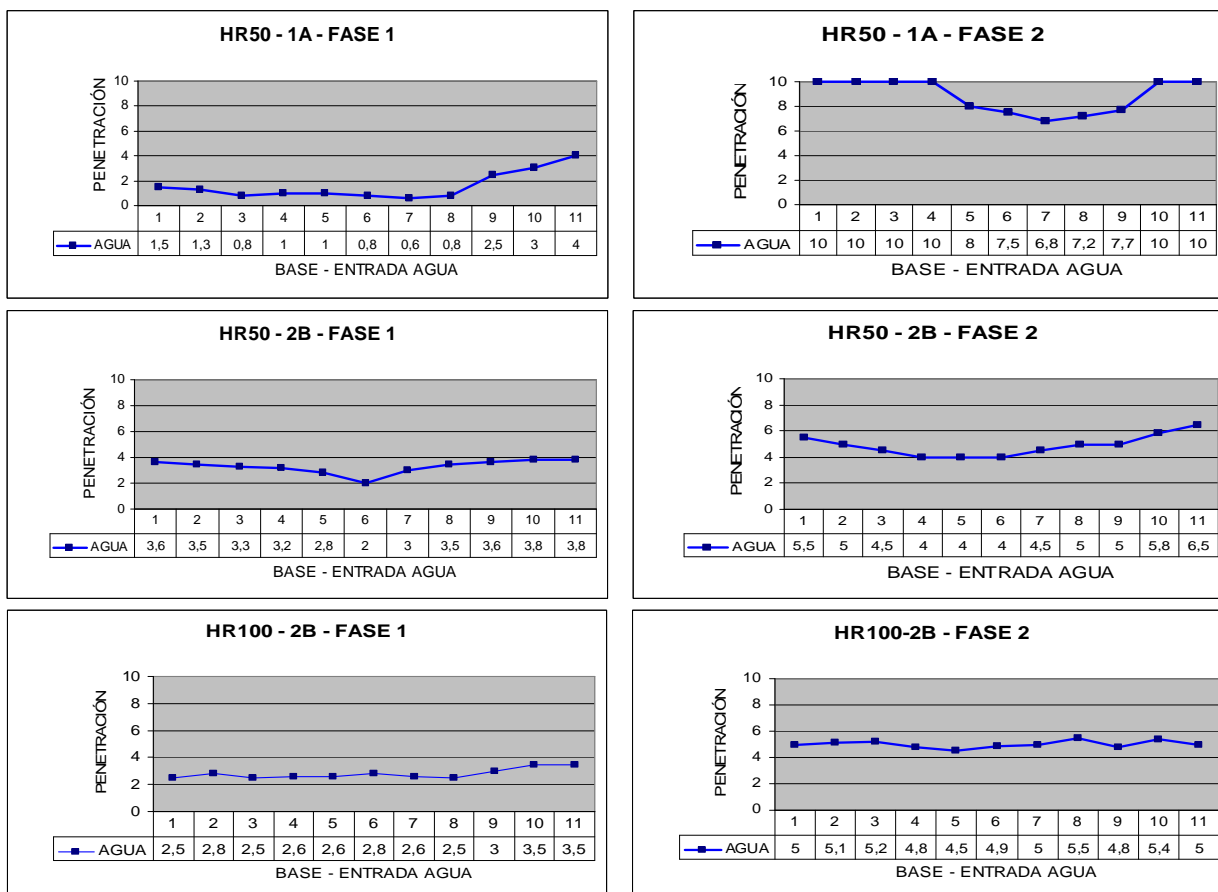


Figura 62: Permeabilidades HR50 – 1A, HR50 – 2B y HR100 – 2B de las fases 1 y 2.

Las figuras de la columna izquierda pertenecen a la Fase 1, presaturación, y las de la columna derecha a la Fase 2. Los valores indican claramente que la presaturación es beneficiosa para la permeabilidad cuando se trabaja con relaciones agua/cemento relativamente bajas, y en este caso, en la fase 1 ya se ha explicado que la relación a/c efectiva es menor de 0,5. Esto podría explicarse también por el hecho de que en la Fase 2, trabajando con el árido Tipo M de la Fase 1, dado que el árido está húmedo se supone al dosificar que el árido reciclado absorberá un 75% de H₂O, pero en la realidad no llega a absorber tal cantidad.

Dado que la permeabilidad de HC – 1A de la fase 2 dio muy baja, se decidió hacer unos ensayos complementarios a algunos de los hormigones de la fase 2 para obtener mayor fiabilidad en los resultados. Se ensayaron una muestra de HC y otra de HR20, y los resultados que se obtuvieron se reflejan en la tabla 32.

Tabla 32: Permeabilidades HC – 1B y HR20 – 1B de la Fase

	PENETRACIÓN FASE 2 (extra)	
	HC – 1B	HR20 – 1B
Penetración H ₂ O en diferentes puntos de la muestra (cm)	7,5	8,5
	7,2	9
	7,1	9
	7	9
	7	9,1
	7,4	9,2
	7,1	9,3
	7	8,9
	6,9	9
	6,9	9
	6,8	9
MEDIA (cm)	7	9

Hay una gran dispersión en los resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad de HC de la Fase 2, pues al tratarse de hormigón convencional los valores deberían entrar en el rango admisible por la normativa, es decir, una media de permeabilidad menor de 30 mm, como es el caso del HC – 1A que da una media de 5,7 mm, y en cambio el HC – 1B da una media de 70 mm. Esta dispersión es debida a causas técnicas de la maquinaria de ensayo, y por tanto las permeabilidades de los hormigones reciclados de la Fase 2 siguen siendo mayores que las de la Fase 1.

5.3.5.3. Permeabilidad F3 y comparación con F2

Los hormigones de la Fase 3 se fabricaron con la misma metodología de trabajo que en la Fase 2, es decir, sin presaturación, pero se eliminó del árido reciclado todo el contenido bituminoso. A este árido sin betún se le llamó árido *Tipo B*, y se decidió hacer la comparativa puesto que el árido *Tipo M* utilizado en las dos primeras fases tenía un alto porcentaje de betún, sobre el 10%, llegando en algunas muestras a ser del 15%. Todos los hormigones son de relación a/c=0,5. Obviamente no se fabricó hormigón convencional en la Fase 3 por ser el mismo que en la Fase 2.

Para un mejor estudio de la Fase 3 se comparan los resultados con los obtenidos en la Fase 2, de esta forma en la tabla se presentan la media de las permeabilidades en centímetros obtenidas en los hormigones HR20, HR50 y HR100 de la Fase 3 y la Fase 2, con árido *Tipo B* y árido *tipo M* respectivamente, sin presaturación, tabla 33.

Tabla 33: Permeabilidades HR20, HR50 y HR100 de las Fases 2 y 3.

	PENETRACIÓN H ₂ O (cm)	
	FASE 3	FASE 2
HR20 – 1A	8	3,7
HR20 – 2B	9,1	5,52
HR50 – 1A	8,1	8,83
HR50 – 2B	8	4,78
HR100 – 1A	7	2,71
HR100 – 2B	8,5	5

Según los resultados obtenidos es evidente que la extracción de betún no solamente agrava la permeabilidad de las probetas, sino que éstas se convierten en altamente permeables. El betún es un material impermeable y no poroso, y por ello la permeabilidad de la Fase 2, con árido *Tipo M* da más baja que en la Fase 3. Aunque para las propiedades mecánicas del hormigón el contenido de betún no es beneficioso (ver apartado 5.3.2.1), se comprueba que la permeabilidad de un hormigón reciclado es menor si el árido reciclado contiene un alto porcentaje de betún, como el árido *Tipo M*, con 10% de betún, aunque la normativa española actual especifique que el contenido bituminoso en el árido reciclado no pueda ser superior al 1%.

5.3.5.4. Permeabilidad F4 e hipótesis F5.

Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de este estudio era analizar los efectos de la carbonatación del árido reciclado en la permeabilidad y las propiedades mecánicas del hormigón reciclado. La Fase 5 que correspondía a la fabricación y análisis de hormigones con árido *Tipo F* carbonatado no se ha podido llevar a cabo experimentalmente pero se ha realizado un amplio estudio al respecto, lo que nos permite realizar unas hipótesis técnicas y abrir el frente de investigación experimental sobre el tema en cuestión.

La metodología de trabajo inicial era ejecutar experimentalmente la Fase 4 con el árido *Tipo F*, con un grado mínimo de carbonatación, realizar los ensayos pertinentes y posteriormente ejecutar la Fase 5 con el mismo árido *Tipo F*, con un alto grado de carbonatación tras someterlo a una carbonatación acelerada. Con los datos de ambas fases se podría ver de forma fiable los efectos de la carbonatación del árido en los hormigones.

Tabla 34 Permeabilidad HR20, HR50 y HR100 de la Fase 4 e hipótesis de permeabilidad de la fase 5.

	PENETRACIÓN H ₂ O (cm)	
	FASE 4 Experimental	FASE 5 Hipótesis
HR20 – 1A	2	$\cong 2$
HR20 – 2B	2,5	$\cong 2$
HR50 – 1A	2,5	≤ 2 *
HR50 – 2B	2,8	$\cong 2$
HR100 – 1A	3,5	≤ 2 *
HR100 – 2B	3,8	$\cong 2$

* En base a la teoría de la mayoría de zonas de debilidad ITZ concluida en el apartado 5.3.5.1

Dado que los datos de la Fase 5 no se pueden presentar en este documento, se detallan los resultados experimentales de la Fase 4 y se realizan las hipótesis basadas en los estudios de otros autores respecto al tema de la carbonatación. En la tabla 34 vemos las permeabilidades obtenidas en la Fase 4 y los resultados hipotéticos que se obtendrían en la Fase 5.

Se observa que las permeabilidades de esta fase 4 son relativamente bajas comparadas con las demás fases, se debe a que el árido *Tipo F* en el momento de la fabricación de hormigón tiene una humedad cercana al 4%, muy alta comparada con los demás tipos de áridos; esto daría a este árido una condición aproximada a la saturación provocada en la Fase 1, con lo cual se ratifican los análisis de esta fase, dejando claro que puede ser beneficioso el presaturar los áridos los instantes previos a la fabricación.

La permeabilidad de la Fase 4 va en aumento a medida que aumentamos la sustitución de árido reciclado, de forma que el HR100 es más permeable que el HR20, lo que es natural debido al aumento en el volumen de poros originado por el aumento de árido reciclado en el conjunto. Sin embargo en este estudio se cree que con los efectos de la carbonatación en los áridos no habría gran variación de resultados entre un hormigón HR20 y un HR100, ya que la carbonatación aumenta la densidad del árido y, en cierto modo, hace que se asemeje en cuestiones de densidad a un árido natural, con lo que no habría diferencias entre el volumen de poros de uno y otro. En la figura vemos cómo la permeabilidad de una muestra baja considerablemente con la carbonatación, Ha-Won Song [16], lo que nos lleva a pensar que carbonatando todos los áridos reciclados que compongan un hormigón obtendríamos unos valores de permeabilidad cercanos a los del hormigón convencional.

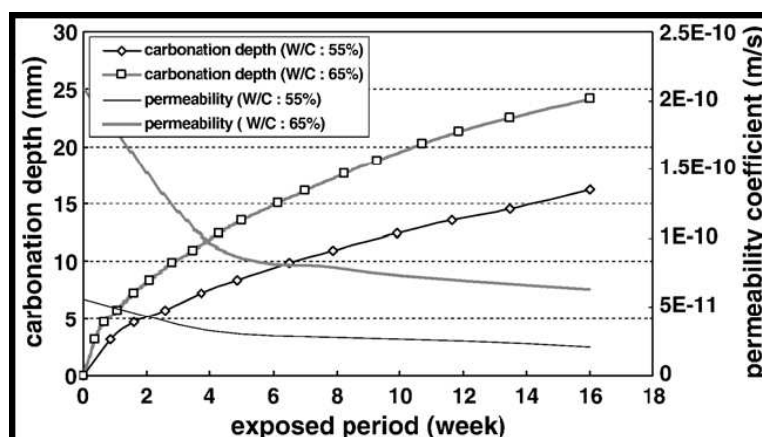


Figura 63: Evolución de la permeabilidad con la carbonatación [9].

. El gráfico de la figura 63 está referido a muestras de hormigón y en este estudio se ha trabajado sobre los mismos áridos que lo componen, no sobre el conjunto de hormigón, pero dado que el componente que aporta porosidad a la mezcla son los áridos, se pueden extrapolar las ideas concluidas por el autor [9].

5.3.5.5. Fases 1-2-3-4-5

Veamos en la tabla 35 un resumen de todas las permeabilidades obtenidas tras los ensayos de cada fase, donde podremos observar mejor los efectos de la metodología de fabricación y tratamiento del árido reciclado para obtener unas buenas prestaciones en lo que a permeabilidad se refiere:

Tabla 35: Permeabilidades Fases 1-2-3-4 e hipótesis de Fase 5

	PERMEABILIDAD (cm)					
	FASE 1		FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5
	a/c=0,65	a/c=0,5				
HC – 1A	5,33	2,61	0,57	-	-	-
HC – 2B	7,24	3,35	3,55	-	-	-
HR20 – 1A	2,62	2,1	3,7	8	2	≅ 2
HR20 – 2B	8,0	4,38	5,52	9,1	2,5	≅ 2
HR50 – 1A	8,3	1,65	8,83	8,1	2,5	≤ 2 *
HR50 – 2B	10	3,26	4,78	8	2,8	≅ 2
HR100 – 1A	10	2,86	2,71	7	3,5	≤ 2 *
HR100 – 2B	10	2,88	5	8,5	3,8	≅ 2

En la tabla se aprecian los efectos positivos de trabajar con los áridos reciclados húmedos o bien mojados directamente (Fase 1 a/c=0,5, Fase 4), se puede ver que un alto contenido de betón no es perjudicial para la permeabilidad (Fase 2), y las hipótesis realizadas sobre la fase 5 indican que la carbonatación de los áridos reciclados sería beneficiosa para la permeabilidad (Fase 5).

6. CONCLUSIONES

Después del estudio realizado sobre la metodología de tratamiento de los áridos reciclados para la mejora de las propiedades del hormigón reciclado, las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

1. En el caso de hormigones con una relación a/c baja, la presaturación de los áridos previa al amasado es beneficiosa para la resistencia a compresión. Este efecto es más significativo cuanto mayor sea el porcentaje de sustitución de áridos reciclados.
2. La presaturación de los áridos se considera un buen método para la mejora de las propiedades del hormigón reciclado, aunque el método es de difícil aplicación en obra.
3. Del agua total retenida por los áridos en la presaturación, en el árido natural más del 90% es superficial, mientras que en el reciclado solamente el 30-40% es superficial. El árido reciclado absorbe cerca de un 75% de su capacidad a los 10 minutos de saturación, lo que conlleva a no controlar el agua añadida, y por ello hay dispersión de resultados. En hormigones con alto porcentaje de árido reciclado existe menor dispersión de resultados y por tanto de propiedades mecánicas si se realiza la presaturación. Para futuros estudios al respecto, se remarca que un mayor porcentaje de árido reciclado proporciona menor dispersión en los ensayos.
4. Presaturando los áridos observamos cómo el aumento de árido reciclado es beneficioso para la resistencia a compresión pero en cambio negativo para la resistencia a tracción. Cuando los áridos no están presaturados la evolución de la resistencia es la normal y esperada según la evolución de la resistencia a compresión, es decir, a medida que se aumenta el árido reciclado la resistencia a compresión disminuye y la resistencia a tracción se mantiene más o menos estable, probablemente debido a una mejor ITZ

5. En hormigones con alto porcentaje de contenido de betún se aprecia una disminución de la succión a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado.
6. En hormigones fabricados con altos porcentajes de árido reciclado (50-100%) procedente de hormigón con 0% de contenido de betún la succión se mantiene constante. Para hormigones con valores de sustitución bajos (20%) la succión del hormigón es menor y el hormigón estará más protegido del ataque de agentes corrosivos.
7. El hormigón fabricado con altos porcentajes de árido reciclado (100%) sufre una reducción de la resistencia del 50% aproximadamente tras la exposición a altas temperaturas (650°C). La presencia de betún en el árido reciclado empeora la resistencia a altas temperaturas.
8. La cara exterior del hormigón presenta menos permeabilidad o bien más resistencia a la penetración de H₂O que las caras interiores, debido al aumento del número de zonas de debilidad ITZ's. Éste fenómeno es interesante pues la cara exterior es la que recibe siempre los ataques de penetración de agua y sustancias no deseables para la durabilidad.
9. En hormigones con una relación a/c alta ($\cong 0,65$) la presaturación de los áridos conlleva unas permeabilidades altas y no deseables debido al aumento del agua libre. Este fenómeno es más significativo a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado, pues pese a reducir la relación a/c efectiva, aumenta mucho la porosidad del conjunto.
10. Los hormigones con más sustitución de árido reciclado (HR50 y HR100) presentan mejores propiedades de permeabilidad respecto al hormigón convencional y el HR20 cuando hay presaturación de los áridos y la relación agua/cemento es baja, además de presentar más linealidad en los resultados de los ensayos.
11. Se comprueba que la permeabilidad de un hormigón reciclado es menor si el árido reciclado contiene un alto porcentaje de betún ($\cong 10\%$), pese a que la normativa española especifique que la cantidad máxima de betún en un hormigón reciclado debe ser $<1\%$
12. Según la investigación generada en este estudio, la carbonatación de los áridos reciclados debería ser beneficiosa para reducir la permeabilidad del hormigón y mejorar sus prestaciones mecánicas. Además, los hormigones deberían presentar similar permeabilidad indistintamente de la cantidad de árido reciclado que se sustituya (HR20, HR50 o HR100), debido a la densificación de los áridos producida por la carbonatación.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

13. Queda abierta la línea de investigación desde éste estudio para comprobar los efectos de la carbonatación del árido reciclado en las propiedades del hormigón.
14. Se deja abierta también la línea de investigación para estudiar los efectos del contenido de betún en los áridos reciclados en las diferentes propiedades del hormigón reciclado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] François Buyle-Bodin, Roumiana Zaharieva. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, 25, 223-232, 2003.
- [2] Miren Etxeberria, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742, 2007.
- [3] Miren Etxeberria et al., Grupo de trabajo "Hormigón Reciclado". Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, 2003.
- [4] Mehta and Monterio, *Concrete (structure, properties and materials)*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 37-42, 1986.
- [5] José M^a Gómez-Soberón, Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate, an experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32, 1301-1311, 2002.
- [6] J.M. Gómez, Enric Vázquez, L. Agulló, *Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material*. Internacional center of Numerical Methods in Engineering (CIMNE). Monograph M60, 1-37, (ISBN 84-89925-80-1), Barcelona, Spain, 2001.
- [7] J.M. Gómez, Enric Vázquez, L. Agulló, Repercussions on concrete permeability due to recycled concrete aggregate, in V.M. Malhotra (Ed.) *Third CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete*, San Francisco, USA, pp.181– 195 (ISBN 0-87031-041-0; SP 202–13), 2001
- [8] Topcu, I. B., and Guncan, N. F. "Using waste concrete as aggregate." *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1385–1390, 1995.
- [9] Van Acker, A. "Recycling of concrete at a precast concrete plant." *Concrete. Precasting Plant Technol.*, 6, 91–101, 1996
- [10] Teranishi, K., Dosho, Y., Narikawa, M., and Kikuchi, M. Application of recycled aggregate concrete for structure concrete. Part 3-Production of recycled aggregate by real scale plant and quality of recycled concrete aggregate. *Proc., Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*, R. K. Dhir, N. A. Henderson, and M. C. Limbachiya, eds., Thomas Telford, London, 143–156, 1998.
- [11] Nobuaki Otsuki, M.ASCE, Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 10.1061/ASCE 0899-1561, 15:5 443-451, 2003.

- [12] Mulheron, M.; O'mahony, M. "The durability of recycled aggregates and recycled aggregate concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasay; pp 633-642; Noviembre 1988.
- [13] Barra, M.; Vázquez, E. Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación con hormigón armado; Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Diciembre 1996.
- [14] Y. N. Ghan, G. F. Peng, M. Anson, Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Composites 21, 23-27, 1999.
- [15] David Dollimore, A thermal analysis study of recycled portland cement concrete (RPCC) aggregates, Thermochimica Acta 357±358, 31±40, 2000.
- [16] Ha-Won Song, Seung-Jun Kwon, Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, Cement and Concrete Research, 37, 909–915, 2007.
- [17] Ján Jerga, Physico-mechanical properties of carbonated concrete, Construction and Building Materials, 18, 645–652, 2004.
- [18] Lulu Basheer, Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and Building Materials, 15, 93-103, 2001.
- [19] C.L. Page, D.J. Anstice, The pore solution phase of carbonated cement pastes, Cement and Concrete Research, 35, 377– 383, 2005.
- [20] V.T. Ngala, Effect of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, 27, 995–1007, 1997.
- [21] Ortiz Lozano, J. Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Tesis Doctoral ETSECCPB-UPC, 1989.
- [22] Jahren PA. Fire resistance of high strength/dense concrete with particular references to the use of condensed silica fume – a review. In Proceedings of the Third International Conference, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, AC1 SP-114, Detroit, USA, pp. 1013-1049, 1989
- [23] H. Wierig, Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure, RILEM. Seminar, Hannover, Germany, pp. 239-249, 1984.

Instrucción hormigón estructural. EHE
B.O.E. // Real Decreto 105/2008
E.D.A, European Demolition Association

NORMAS

Europeas

UNE EN 196-1:1996	<i>Determinación de las resistencias mecánicas</i>
UNE 83133:1990	<i>Determinación de la absorción de agua por la arena</i>
UNE 83134:1990	<i>Determinación de la absorción de agua por la grava</i>
UNE EN 933-1:1998	<i>Determinación del análisis granulométrico de los áridos</i>
UNE EN 83313:1990	<i>Medida de la consistencia del hormigón fresco por el método del cono de Abrams</i>
UNE 83-312-90	<i>Determinación de la densidad en hormigón endurecido</i>
UNE 83-304-84	<i>Ensayos de hormigón. Rotura por compresión</i>
UNE 83-306-85	<i>Ensayos de hormigón. Rotura por tracción indirecta</i>
UNE 83316:1996	<i>Ensayo de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión</i>
BS 1881-5:1970	Ensayos de absorción superficial, ISAT.
BS 1881-7:1988	ensayos de succión. British Standards.

OTRA BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- I. F.T. Olorunsogo, N. Padayachee, Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes, Cement and Concrete Research, 32, 179-185, 2002.
- II. L.J. Parrott, Variations of water adsorption rate and porosity with depth from an exposed concrete surface: Effect of exposure conditions and cement type, Cement and Concrete Research, 22, 1077-108, 1992.
- III. T.C. Hansen, Recycled of demolished concrete and masonry, Report of Technical Committee 37-DRC Demolition and Reuse of Concrete, Part 1, E&FN SPON, London, pp. 1- 160, 1992

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: caracterización del cemento CEM-I 42,5 N/SR utilizado y requisitos según RC-03.....	30
Tabla 2: Granulometría de la arena, grava y gravilla naturales utilizadas	31
Tabla 3: propiedades físicas de los diferentes tipos de áridos.....	32
Tabla 4: <i>Cantidad (% respecto al peso de la muestra) de H₂O absorbida por el árido en 10' tras saturar y tras secar la superficie, en el árido natural y Tipo M (Fases 1 y 2).</i>	32
Tabla 5: Especificaciones recomendadas para el árido natural y el árido reciclado según EHE.	33
Tabla 6: Componentes de los áridos (% sobre el peso total).....	33
Tabla 7: Granulometría de los diferentes tipos de áridos utilizados.....	34
Tabla 8: <i>Recuento de probetas fabricadas</i>	36
Tabla 9: % H ₂ O (absorbida + superficial) introducida en la presaturación.....	41
Tabla 10: Dosificación H25 (a/c=0,65), Fase 1. Pesos en kg.....	41
Tabla 11: Dosificación H40 (a/c=0,5), Fase 1. Pesos en kg.	42
Tabla 12: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40 (a/c=0,5), Fase 2. Pesos secos (kg).....	42
Tabla 13: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40, Fase 2. Pesos húmedos (kg).....	43
Tabla 14: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40, Fase 3. Pesos secos (kg).	44
Tabla 15: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40, Fase 3. Pesos húmedos (kg).....	44
Tabla 16: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40, Fase 4. Pesos secos (kg).	45
Tabla 17: Dosificación 1 m ³ de hormigón H40, Fase 4. Pesos húmedos (kg).....	45
Tabla 18: <i>Consistencia del hormigón en función del asiento del cono de Abrams.</i>	48
Tabla 19: <i>Cantidad (%) de aditivo añadida en cada fase y consistencia obtenida (cm).</i>	62
Tabla 20: <i>Temperatura (°C) tomada en el proceso de amasado.</i>	65
Tabla 21: <i>Resistencia a compresión y a tracción de los hormigones fabricados en la fase 1: Proyecto RECHNOR.</i>	66
Tabla 22: Resistencias a compresión y a tracción de los hormigones fabricados. Determinación del módulo de elasticidad	69
Tabla 23: Resistencias a compresión de las fases 1, 2, 3	70
Tabla 24: Resistencias a compresión y a tracción de los hormigones fabricados.	72
Tabla 25: Succión Fase 2 (mm/min ^{0,5}).	74
Tabla 26: Succión Fases 2 y 3 (mm/min ^{0,5}).	75
Tabla 27: Succión Fases 4 e hipótesis Fase 5.....	76
Tabla 28: efectos de la alta temperatura en la resistencia a compresión, fase 2 y 3.....	77
Tabla 29: Permeabilidad HC – 1A	80
Tabla 30: Permeabilidades Fase 1	81
Tabla 31: Permeabilidades Fase 1 y Fase	84
Tabla 32: Permeabilidades HC – 1B y HR20 – 1B de la Fase	86
Tabla 33: Permeabilidades HR20, HR50 y HR100 de las Fases 2 y 3.....	87
Tabla 34: Permeabilidad HR20, HR50 y HR100 de la Fase 4 e hipótesis de permeabilidad de la fase 5.	88
Tabla 35: Permeabilidades Fases 1-2-3-4 e hipótesis de Fase 5.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el tamaño máximo del árido reciclado y su absorción.....	16
Figura 2: Afectación del tamaño de los poros. r =factor de sustitución.....	17
Figura 3: Relación resistencia media a compresión – agua/cemento total según curva de Abrams.....	19
Figura 4: Porosidad total vs Resistencia a compresión.....	20
Figura 5: Evolución de la Resistencia a compresión del hormigón sometido a altas temp	22
Figura 6: Evolución de la carbonatación con a/c.....	23
Figura 7: Aumento de la densidad según el tiempo de carbonatación.....	23
Figura 8: Relación entre el volumen y el tamaño de los poros.....	24
Figura 9: Relación entre porosidad y propiedades	25
Figura 10: Efecto de la carbonatación en la permeabilidad.....	26
Figura 11: Antigua ITZ de los áridos reciclados.....	26
Figura 12: Antigua y nueva ITZ de los áridos reciclados.....	27
Figura 13: Granulometría áridos para la fabricación de hormigones	31
Figura 14: Determinación del grado de carbonatación mediante fenolftaleína	34
Figura 15: Granulometría áridos reciclados para la fabricación de hormigones.....	35
Figura 16: Tipos de probetas fabricadas, cúbicas, cilíndricas 15x10 y cilíndricas 30x15.....	36
Figura 17: Imágenes del proceso de amasado del hormigón (a)	37
Figura 18: Imágenes del proceso de amasado del hormigón (b).....	37
Figura 19: Cámara fabricada para la carbonatación acelerada del árido Tipo F	46
Figura 20: Árido carbonatado (izda) y árido no-carbonatado (dcha).....	46
Figura 21: Ensayo de rotura por compresión (a)	49
Figura 22: Ensayo de rotura por compresión (b)	49
Figura 23: Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (a)	49
Figura 24: Resultados obtenidos en el ensayo de compresión (b)	49
Figura 25: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción (a).....	50
Figura 26: Resultados obtenidos en el ensayo de tracción (b).....	51
Figura 27: Determinación del módulo elástico probeta hormigón.....	51
Figura 28: Determinación del módulo elástico (a)	52
Figura 29: Determinación del módulo elástico (b)	52
Figura 30: Ensayo de absorción superficial (ISAT) según BS 1881-5	54
Figura 31: Representación del ensayo de succión.....	55
Figura 32: Impermeabilización de probetas	55
Figura 33: Imagen del ensayo de succión	56
Figura 34: Ensayo de resistencia a altas temperaturas.....	56
Figura 35: Ensayo de Permeabilidad (a)	57
Figura 36: Ensayo de Permeabilidad (b)	57
Figura 37: Criterio de toma de muestras para el ensayo de permeabilidad.....	58
Figura 38: Imágenes prensa hormigón para ensayo brasileño.....	58
Figura 39: Imágenes ensayo de permeabilidad (1).....	59
Figura 40: Imágenes ensayo de permeabilidad (2).....	59
Figura 41: Consistencias Fase 1	62
Figura 42: Consistencias Fase 1, 2 y 3 del hormigón HR20	64
Figura 43: Dispersión ensayo de compresión Fase 1 ($a/c=0,65$)	68
Figura 44: Dispersión ensayo de compresión Fase 1 ($a/c=0,5$)	68
Figura 45: Efectos de la presaturación en las propiedades mecánicas	71
Figura 46: Succión Fase2.....	74

Figura 47: Succión Fase 3.....	75
Figura 48: Succión Fase 4.....	76
Figura 49: Porcentaje de aportación a la resistencia de las muestras expuestas y no-expuesta	78
Figura 50: Gráfico de penetración de una muestra ensayada	79
Figura 51: Permeabilidad HC – 1A	80
Figura 52: Permeabilidad HC – 2B	80
Figura 53: Probeta 1A; base enrasada.....	81
Figura 54: Probeta 2B; base con más ITZ.....	81
Figura 55: Permeabilidad HR20 – 1ª.....	82
Figura 56: Permeabilidad HR20 – 1A.....	83
Figura 57: Permeabilidad HR20 – 2B.....	83
Figura 58: Permeabilidad HR50 – 1A.....	83
Figura 59: Permeabilidad HR100	83
Figura 60: Permeabilidad HR20 – 2B.....	84
Figura 61: Permeabilidad HR100 – 1A.....	84
Figura 62: Permeabilidades HR50 – 1A, HR50 – 2B y HR100 – 2B de las fases 1 y 2.....	85
Figura 63: Evolución de la permeabilidad con la carbonatación.....	89